

化学除草剂对农田生物群落的影响

黄顶成, 尤民生*, 侯有明, 李志胜

(福建农林大学应用生态研究所, 福州 350002)

摘要:从直接作用和间接作用两个方面,在个体、种群和群落 3 个水平上综述了化学除草剂对农田植物、动物和微生物群落的影响,并提出了今后需要加强研究的几个问题:(1)残留在作物和杂草植株内的除草剂及其代谢产物通过食物链和生物富集作用对农田动物群落各级消费者造成的影响;(2)非作物生境使用化学除草剂对毗邻作物生境天敌群落的影响,以及作物生境使用除草剂对邻近非作物生境天敌群落的影响;(3)由除草剂长期使用引起的杂草群落演替、多样性下降、地表覆盖物和地下生物量减少对土壤动物和微生物群落的物种组成、分布、丰富度及其生态功能的影响;(4)化学除草剂与杀虫剂和化肥等其他农用化学品对农田生物群落的联合作用。

关键词:化学除草剂;农田生态系统;生物群落;生态影响

文章编号:1000-0933(2005)06-1451-08 **中图分类号:**Q145,S482.4,X176 **文献标识码:**A

Effects of chemical herbicides on bio-communities in agroecosystems

HUANG Ding-Cheng, YOU Min-Sheng*, HOU You-Ming, LI Zhi-Sheng (*Institute of Applied Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, 350002, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1451~1458.

Abstract: The existing literature was reviewed to address the direct and indirect effects of chemical herbicides on the bio-communities in agroecosystems. Continual use of chemical herbicides may bring about the resistance of weeds to herbicides, accelerate the succession and decrease the biodiversity of the weed community. If abused, herbicides might change the biochemical composition of the crops, affect the nitrogen metabolism and the crop's resistance to pests and diseases, aggravate or alleviate plant diseases and insect pests, and cause serious damage to crops. The direct effects of herbicides on animals and microorganisms vary with the type and concentration of the herbicides, as well as, the type and developmental stages of the organisms. Moreover, the direct effects of herbicides on the crops and non-crop plants will cause a series of changes on the associated fauna and microorganisms. Most of the direct and indirect effects have been interpreted as negative from ecological and sustainable points of view. The following subjects are suggested for further study: (1) How might the residual herbicides and their metabolites left in crops and weeds effect all trophic levels of fauna in the fields via food chains and bioaccumulation; (2) How might herbicides used in non-crop habitats impact the neighboring plants and associated fauna, and vice versa; (3) What might the changes in the weed community, as well as, the decrease of diversity, earth-surface shroud and the underground biomass be, due to prolonged application of herbicides, which might induce impacts the composition, distribution, abundance and eco-function of the bio-communities in the soil; (4) What might the combined effects of herbicides and other agricultural chemicals be on the flora, fauna and microorganism in agroecosystems.

基金项目:科技部国际科技合作重点资助项目(2003DF030008);国家自然科学基金资助项目(30170618;30471151)

收稿日期:2004-07-13;**修订日期:**2005-11-04

作者简介:黄顶成(1979~),男,福建泉州人,硕士生,主要从事昆虫生态与害虫综合治理研究。E-mail: huangdc2003@yahoo.com.cn

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: msyou@fjau.edu.cn

致谢:本文得到复旦大学生物多样性研究所吴纪华副教授的关心和指导,美国加州理工学院化工系 2005 级博士生林柏霖同学提供了部分外文文献,在此一并致谢

Foundation item: Key international cooperation project supported by the Ministry of Science and Technology of China (No. 2003DF030008); National Natural Science Foundation of China (No. 30170618 and 30471151)

Received date: 2004-07-13; **Accepted date:** 2005-11-04

Biography: HUANG Ding-Cheng, Master candidate, mainly engaged in insect ecology and integrated pest management. E-mail: huangdc2003@yahoo.com.cn

Key words: chemical herbicide; agroecosystem; bio-community; ecological effect

自 1942 年除草剂 2,4-D 用于防除农田杂草以来,人类使用有机化学除草剂防除农田杂草已有 60 多年的历史。目前,西方发达国家在 85%~100% 的作物上使用除草剂^[1],全球化学除草剂的用量、施用面积均已超过了杀虫剂和杀菌剂的总和^[2]。我国农田化学除草始于 1956 年,至今也有 40 多年的历史。近年来,我国除草剂的年生产量不断提高,已由 1991 年的 1.98 万 t (有效成分) 增长到 1998 年的 3.50 万 t,在农药年生产总量所占的比例从 1991 年的 7.82% 上升到 1999 年的 20.17%,全国农田化学除草剂施用面积从 1985 年的 867 万 hm² 上升到 2000 年的 6 700 万 hm²,约占全国种植面积的 40% 以上^[3]。

然而,在所施用的农药中,真正起作用的很少,其余的大部分都残留在土壤和淋溶于水中,对农田生物群落产生严重的影响^[4]。随着人类保护环境和生物多样性意识的提高,特别是在大力倡导可持续发展的今天,农药对农田生态环境和农业生产的危害,已引起世界各国的普遍关注^[5]。近几十年来,有关使用化学除草剂对农田各类生物所造成的直接和/或间接影响,已有大量的研究报道^[2, 6~14]。特别是 2002 年有关世界范围内广泛使用的除草剂——阿特拉津(Atrazine),在极低的剂量下诱发雄蛙雌化的报道^[15, 16],更加引起人们对除草剂生态影响的重视。

1 化学除草剂对农田植物群落的影响

1.1 化学除草剂对杂草的影响

1.1.1 产生杂草抗药性群体 长期、广泛、大量使用化学除草剂给当地杂草群落施加了强大的选择压力,影响了杂草的微观进化,致使杂草抗药性生物型不断产生。20 世纪 50 年代首次发现抗 2,4-D 的杂草竹节花(*Commelina diffusa*)和野胡萝卜(*Daucus carota*);60 年代只有少量关于杂草产生抗药性的报道^[2]。随着除草剂使用时间的增加,抗药性杂草种类数也不断增加,分布范围不断扩大。据统计,从 1970 年到 1977 年,全世界平均每年发现 1 种杂草抗药性生物型,自 1978 年以后,上升到每年 9 种,抗药性杂草物种数由 1981 年的 48 种上升到 1990 年的 113 种^[17]。而最新的统计数字远不只这些。据 Heap 报道,在 42 个国家和地区共发现 183 种杂草抗药性生物型(124 个种);到了 1999 年,杂草抗药性生物型的数量又增加了 39 种,物种数相应地增加了 23 种^[10, 12]。杂草抗药性问题的严峻形势已引起了全世界的高度重视,国际上专门召开了多次杂草抗药性学术会议。多数学者担心,除草剂抗药性的严重程度有可能超过杀虫剂和杀菌剂^[2]。

1.1.2 加速杂草群落演替 在连续多年使用同一种(类)除草剂后,大量对除草剂敏感的群体被杀死而减少,而另一些不敏感或已产生抗性的群体得以繁衍,致使农田杂草种群迅速更迭,群落结构发生改变,演替加速,次要杂草上升为优势种群并滋生为害,增加了防除的难度^[18, 19]。在冬小麦田中连续施用绿麦隆(Chorotoluron),会导致睫毛婆婆纳(*Veronica hederifolia*)种群上升^[20]。在我国上海地区,麦田长期使用 2,4-D 等选择性除草剂后,阔叶杂草逐渐减少,而看麦娘(*Alopecurus atqualis*)、日本看麦娘(*A. japonicus*)等禾本科杂草增加;改用绿磺隆(Chlorsul-furon)后,尽管抑制了看麦娘、日本看麦娘和猪殃殃(*Galium aparine* var. *tenerum*)等杂草的危害,却又使硬草(*Sclerochloa kengiana*)、罔草(*Beckmannia syzigachne*)等种群迅速增长,上升为优势种群,也使得原先仅分布于非作物生境的棒头草(*Polypogon fugax*)侵入麦田成为恶性杂草^[2]。稻田和棉田也有与此相似的现象发生^[21, 22]。Freemark 等这样总结道,在杂草地和弃耕田(old field)等非作物生境,只要连续 1~4a 单一地使用 2,4-D、西玛津(Simazine)和毒莠定(Picloram)等除草剂,杂草群落的物种组成和个体数量就会发生明显的变化^[23]。

1.1.3 降低杂草群落多样性 长期使用除草剂还会降低农田植物的多样性。在除草剂的长期单向选择压力下,敏感群体无法继续生存,出现的频率逐渐减少甚至绝迹,像麦仙翁(*Agrostemma githago*)这种杂草已难在农田中发现了^[24]。余柳青等^[25]对浙江省吉安县稻田环境植物多样性调查时发现,禹山坞稻田普遍使用化学除草剂,其杂草种类和数量明显少于使用除草剂较少的城北村,除草剂的使用改变了禹山坞稻田杂草优势种,使耐除草剂的水竹叶(*Murdannia trigueta*)成为该村杂草优势种并蔓延为害,而城北村稻田中的槐叶萍(*Satvinia natans*)、满江红(*Azolla imbricata*)等植物由于少用除草剂而得以生存^[25]。在加拿大魁北克南部地区,人们发现,由于除草剂的长期使用,农田植物多样性明显下降,邻近(5m 左右)草地和林地的植被也受到影响^[26]。

1.2 化学除草剂对作物的影响

大部分除草剂正常使用时不会对适用作物造成较大的伤害,但会影响其生理、生化和代谢。已有不少研究表明,除草剂会影响作物的生化组成和氮代谢。例如,丁草胺(Butachlor)和二氯喹啉酸(Quinclorac)等除草剂处理后,水稻叶鞘内游离氨基酸含量明显增加,蔗糖含量和总酚含量均下降^[27, 28]。除草剂 Aminopielik D 施用后,冬小麦的氨基酸含量会增加^[29]。氟乐灵(Trifluralin)可诱导马铃薯产生一种具有杀菌活性的化合物^[30]。进一步的研究表明,这种生理生化上的变化会影响作物的抗虫、抗病性,促进或抑制害虫或病原生物的生长和增殖,从而间接地影响作物的生长^[27, 30]。

除草剂的施用时间、药量、方式及对象和施用时的气候条件掌握不合理,以及药雾漂移,均会造成药害,轻者可使作物叶色反常变绿或黄化,影响生长和发育;重者甚至会导致作物生长停止,茎叶扭曲萎缩、死亡,杂草也难以生长,大大降低农田植物生

物量^[31]。半衰期长的除草剂不科学使用还会毒害下茬作物^[32]。

2 化学除草剂对农田动物群落的影响

由于化学除草剂的靶标生物为植物,且对脊椎和无脊椎动物的急性毒性较低,因而人们往往容易忽视其对动物的影响。已有大量的研究表明,除草剂对农田多种动物是不安全的。除草剂可从直接和间接两方面对处于不同营养层次的动物产生影响。

2.1 化学除草剂对无脊椎动物的影响

农田中生活着种类丰富、个体繁多的昆虫、蜘蛛、蛱蝶、蚯蚓和线虫等无脊椎动物。大量试验证明,许多除草剂对这些动物的生长发育、繁殖和存活具有显著直接杀伤作用。

不同种类的除草剂对无脊椎动物的直接影响不同。例如,除草剂 Zeazin 50 对蚯蚓的杀伤力比阿特拉津等其他 4 种除草剂小^[33]。在田间使用剂量下,磺乐灵(Nitralin)可引起高达 57.89% 的弹尾虫死亡^[34]。而乙草胺(Acetochlor)、苄磺隆(Benzsulfuron methyl)、金秋(Cyclosulfamuron)等除草剂对白背飞虱(*Sogatella furcifera*)及其天敌尖钩宽尾螳(*Microvelia horvathi*)和拟水狼蛛(*Pirata subpiraticus*)等杀伤作用不大^[35~37]。杀伤作用的大小还与生物种类及其发育阶段有关。草胺磷(Glufosianate)在 540mg/L 浓度下对天敌昆虫(*Chrysopa pallens*)的幼虫和蛹没有毒,对异色瓢虫(*Harmonia axyridis*)的卵和成虫也无直接杀伤作用,但可引起一龄、四龄幼虫及蛹较高的死亡率,分别为 100%、51.1%和 24.5%^[38]。

化学除草剂对无脊椎动物的间接影响不可忽视。长期进行化学除草不但会改变农田植物群落的物种组成和结构,降低植物多样性,使杂草生物量长期维持在较低的水平,从而引起植食性昆虫的种类和数量也相应地发生变化,进而影响到这些植食者的天敌种类和数量。早在 1967 年,Leius 就发现,在安大略地区的一些果园进行化学除草后,一些冷蛾(codling moth)幼虫和天幕毛虫(tent caterpillar)的寄生蜂数量减少,致使这两种害虫大量增加,这是由于杂草化学防除后,果园中的杂草生物量大大减少,这些寄生蜂因为无法获得杂草花蜜补充养分而过早死亡^[39]。Hald 等也指出,植物种类多样性的维持对食草昆虫数量的维持很重要,常规农场中的植物、食草昆虫和其他无脊椎动物的种类和数量均明显低于不使用或较少使用除草剂的有机农场^[40]。巫厚长等的田间调查表明,烟田化学除草后,捕食类节肢动物的相对丰盛度减少,特别是皿蛛科等游猎型的蜘蛛,认为这可能与烟田植物多样性减少和植被覆盖度下降有关^[41]。Haughton 等一系列的研究也表明,草甘膦(Glyphosate)对田边杂草地蜘蛛群落的间接影响更甚于直接影响^[42~44]。

许多研究表明,大面积使用除草剂也是害虫猖獗的原因之一。例如,Aminopielik D 等除草剂防除冬麦田杂草后,促进了禾谷缢管蚜(*Rhopalosiphum padi*)和麦长管蚜(*Sitobion avenae*)的大量增殖^[29]。二硝基-邻-甲酚(DNOC)等几种除草剂既能杀死害螨,也能杀死捕食螨,结果导致害螨种群因失去天敌的抑制而快速增加^[45]。油菜田过早使用草甘膦、百草枯(Paraquat)等除草剂防除杂草,会引起桃蚜(*Myzus persicae*)数量的增加,这是由于过早除去杂草,使得以杂草为食的圆尾蚜(*Brachycaudus helichrysi*)无法生存,从而延迟了菜田天敌群落的重建^[46]。程遐年和吴进才等的一系列研究表明,丁草胺和苯达松(Bentazon)等一些常用稻田除草剂会降低水稻对褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)的抗性,且对天敌及其替代猎物具有显著的杀伤作用,促进飞虱取食、存活和增殖,认为这是褐飞虱再猖獗的重要原因之一^[27]。

残留或淋溶在土壤环境中的除草剂及其代谢产物也会影响线虫和昆虫等土壤动物群落。例如,西玛津等一些除草剂施用后,豌豆和羽扇豆田土壤中的象鼻虫明显增加,其它昆虫种类和数量减少^[47]。在印度,一项长达 10 多年的调查显示,一些除草剂的使用严重影响了茶园土壤线虫的种群数量^[48]。Khalil 等研究了种植一种鳞茎植物(*Cladiolus hortulans*)的农田使用化学除草剂对土壤动物群落的影响,结果表明,磺乐灵等除草剂严重地杀伤了弹尾虫,改变了土壤动物群落结构,使昆虫和蚯蚓在群落中的比例下降,蛱蝶、马陆和么蚰的比例上升^[34]。除草剂对土壤动物群落的影响可能是土壤环境恶化的原因之一^[49~51]。

2.2 化学除草剂对脊椎动物的影响

就现有的研究资料看,有关化学除草剂对鸟类、青蛙和鱼类等农田脊椎动物的影响的研究,主要集中在直接影响方面。大量研究结果表明,常用除草剂对脊椎动物的杀伤力普遍较低,多数学者认为,正常使用时不会对这些脊椎动物直接造成危害。例如,草甘膦对 *Carassius auratus* 和 *Oncorhynchus mykiss* 这两种淡水鱼的杀伤作用很低,正常使用不会对农田周边水域鱼类有太大的危险^[52]。但也有报道称,丁草胺对鱼类的杀伤作用较大。在黑龙江绥化市某村的养鱼稻田中,曾发现因施用丁草胺而使鱼全部死亡的现象,但在放鱼前换一次水的稻田,鱼就没有危险了^[53]。

然而,也有不少研究认为,一些除草剂会影响脊椎动物的发育和繁殖。氯溴隆(Maloran)对雉鸡鸡蛋胚胎发育具有显著的毒性,可能会影响鸟类的繁殖^[54]。一个典型的例子出自美国科学家 Hayes 及其同事的发现。Hayes 等室内研究表明,当非洲爪蛙(*Xenopus laevis*)的雄性幼体生活在含有 1/10⁸ 阿特拉津的水体中,长大后除了长出睾丸外,还长出卵巢,变成“阴阳蛙”^[15]。这一研究结果得到了一份田间调查报告的佐证。Hayes 等发现,在美国 8 个大量使用阿特拉津的地区中,仅犹他州 Juab 郡没有查出变性豹蛙(*Rana pipiens*),也仅有这一地区阿特拉津的残留浓度低于 1/10⁹^[16]。室内试验和野外调查结果警示人们,阿特拉津的广泛、大量使用可能是导致大范围内青蛙变性和数量减少的原因之一。

除草剂对农田脊椎动物的威胁主要在于间接影响。农田化学除草对周边鸟类群落的影响已有许多报道。例如,在加拿大魁北克南部地区,人们发现,长期使用除草剂已使农田及其周围生境的植物多样性明显下降;而在杂草林木繁茂的农场,鸟类多样性明显高于前者^[26]。在北美和西欧,除草剂的使用严重地改变了农田生境格局,而这种变化对农田中的鸟类、有益昆虫及其他节肢动物明显产生了不利的影响^[23, 55, 56]。在丹麦的一些农场中,大量使用化学除草剂和其它化学农药的常规农场,其鸟类数量仅是不使用化学农用品的有机农场的 37%~51%^[57]。这是因为,化学除草降低了农田植被覆盖度和植物多样性,减少了杂草以及杂草相关的动物的生物量,致使鸟类失去主要的食物来源以及栖息和躲避天敌的场所。

而有关农田化学除草影响青蛙、蛇、蜥蜴和田鼠等脊椎动物的田间调查研究很少报道。近来,生境格局的变化对啮齿类农田小型哺乳动物的影响,已成为一个很活跃的研究课题。农事活动摧毁或恶化了非农田生境,缩小了田鼠取食、定居、繁殖、躲避天敌和不良气候及其它活动的场所,从而间接地影响了啮齿类动物的生存。由此不难推知,这很可能也会影响蛇和蜥蜴等动物。在澳大利亚,已有人利用化学除草剂防除杂草,调控果园附近的非作物生境,以控制当地猖獗的田鼠(*Rattus rattus*),结果减少了 65% 的鼠害^[58]。生境格局的变化有可能是导致蛇、蜥蜴和鼠等农田脊椎动物群落多样性下降的原因之一。

多数除草剂能被植物的根、茎和叶所吸收,作物和杂草是农田生物群落的主要组成部分,是农田生态系统的生产者,是系统中各种动物所需营养物质和能量的主要来源。而不少除草剂对动物具有显著的慢性毒性和遗传毒性,且除草剂的半衰期较长(从少于 1 个月到 1 年多)。因此,残留在植株内的除草剂及其代谢产物还可能会通过食物链和生物富集作用对农田动物群落产生影响。2002 年从德国下萨克森等州的鸡禽产品和鸡蛋中检测到除草醚,调查结果表明,由小麦加工而成的鸡饲料中含有大量除草醚(Nitrofen)^[59]。朱国念等研究表明,草甘膦可从水生植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)向水生动植物麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)体内迁移并积累^[60]。这些研究表明,除草剂能可在食物链中传递和富集。但目前有关这方面特别是在田间条件下的研究报道甚少。

3 化学除草剂对农田微生物的影响

3.1 化学除草剂对植物病原微生物的影响

早在 20 世纪 70 年代之前,就有人注意到,使用克草猛(s-Propyl butylethylthiocarbamate)和杀草敏(Pyrazon)后,甜菜发病率明显提高^[61]。目前已有大量的事例证实,除草剂会直接或间接影响病原物的生长和增殖,从而加重或减轻病害的发生程度。

有些除草剂可直接影响植物病原微生物的营养生长、产孢能力、孢子萌发和腐生能力等,从而改变病原菌的增殖速度。例如,氟乐灵和敌草隆(Diuron)等除草剂在 1 mg/ml 浓度下可抑制棉花枯萎病菌的生长^[62]。哌草磷(Piperophos)在 50 mg/ml 的浓度下(低于推荐浓度),能够完全抑制稻瘟病菌(*Pyricularia grisea*)分生孢子的萌发,有 40% 的菌丝生长受到抑制^[63]。有几种除草剂能改变病毒粒子的形态、抑制其复制,从而减少、减轻病毒病的发生。例如,氟乐灵和西玛津等可致使黄瓜花叶病毒(CMV)粒体变小,结构发生变化,从而抑制其复制增殖^[64]。

除草剂会导致植物发生形态和生理生化上的变化,提高或降低植物的抗病性,间接影响病原生物的生长和增殖。例如,在美国科罗拉多州等地区,人们观察到,几乎所有的糖用甜菜地,在使用除草剂后,菜苗常常呈现出矮化、叶色暗绿、叶片增厚等受害迹象,并可持续到出土后 2~3 周;据此,Wheeler 认为,这可能是由于植株受到除草剂的毒害,致使植物组织不能成熟,细胞膜的渗透性改变,细胞膜和细胞微纤维难以迅速形成,有利于病原菌侵染和存活^[65]。经二硝基苯胺(2,4-Dinitroaniline)类除草剂处理过的瓜苗,谷酰胺和天冬酰胺酸等自由氨基酸含量增多,不利于枯萎病原菌(*Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*)的生长^[66]。

还有研究表明,一些除草剂会影响拮抗菌种群数量,从而打破病菌与其拮抗菌之间的竞争平衡。草甘膦和百草枯等除草剂使用后加重了小麦全蚀病,这与土壤中的 *Eupenicillium euglaucum* (strain B)、*Penicillium uerruculusum*、*Aspergillus viridinutans* 等拮抗菌种群数量减少,拮抗菌与小麦全蚀病菌(*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*)的比例下降有关^[67]。

3.2 化学除草剂对土壤微生物的影响

土壤微生物参与无机质的分解和有机质的矿化与腐殖化,在促进生物地化、改良土壤肥力和维持生态系统物质循环等方面起着重要的作用。因此,探讨除草剂对土壤微生物生物量及其活性的影响,将有助于评价除草剂是否对土壤生产力存在威胁。

有关这方面的研究已做了大量的工作。多数研究支持这样的观点,即大部分除草剂低浓度下对土壤微生物群落影响不大,且这种影响会很快消失,因此,长期使用对土壤微生物、土壤肥力和物质循环不会造成不良影响。例如,2,4-D 和 2,4,5-T 在 0.1%~1% 浓度下,可促进羽扇豆根瘤菌、苜蓿根瘤菌和三叶草根瘤菌的生长,只有当浓度达到 10% 时,才起抑制作用^[68]。可是这个用量远远高于正常使用剂量。二甲戊乐灵(Pendimethalin)和吡氟禾草灵(Fluazifop-butyl)的使用会导致土壤微生物的生物量急剧下降,但这种影响的持续时间很短,播种 40 d 后,生物量会恢复到原有的水平^[69]。吕镇梅等的研究也表明,二氯喹啉酸对水稻田土壤中好氧性细菌、水解发酵细菌、反硝化细菌数量的影响都是短暂的,第 33 天时均能恢复至接近对照水平,正常使用对水田土壤微生物各种群均无实质性危害^[70]。

还有一些研究表明,某些除草剂在田间使用剂量下对尿素分解菌有抑制作用。脲芽孢八叠球菌(*Sporosarcina ureae*)和白色链霉菌(*Streptomyces albus*)是产脲酶的土壤细菌,具有很强的尿素分解能力。在一定的浓度下,丁草胺和杀草丹(Saturn)等除草剂对这两种细菌具有显著的抑制作用。因此,在土壤湿润和无水层状态下,丁草胺和杀草丹结合尿素追肥施用,可以调控稻田土壤中白色链霉菌的数量,降低脲酶活性,从而提高氮肥的利用率^[71, 72]。

然而,也有不少报道与上述看法相反。一些除草剂在推荐浓度下会威胁固氮微生物的生存和影响固氮作用。在 400mg/L (推荐浓度)的丙草胺(Pretilachlor)和利谷隆(Linuron)作用下,大豆根瘤菌(*Rhizobium japonicum*)的存活率分别下降了 27.4% 和 57.8%;百草枯、苯胺灵(Propbam)和阿特拉津在正常使用剂量下也会抑制这类微生物的生长^[73]。阿特拉津和甲草胺(Alachlor)等除草剂会降低玉米地土壤中的细菌总量,减少氧化菌和固氮菌的数量,抑制土壤脱氢酶的活性,而增加真菌和放线菌的数量,而且浓度越高,其抑制作用越大;其中,甲草胺的抑制效果比阿特拉津更高些^[74]。二硝基酚类除草剂在推荐浓度下对土壤呼吸作用和土壤脱氢酶活性的抑制作用均超过 40%,而且这种影响在室内条件下可持续 6 个月以上^[75]。

但是,不少除草剂在剂量和/或浓度较高时对微生物的活性有一定的影响;而且由于不合理的使用和近年来杂草抗药性的加重,除草剂的实际使用浓度往往高于推荐浓度,因此,这些除草剂的长期、广泛、大量地使用可能对土壤环境产生负效应。

从现有的资料看,化学除草剂对土壤微生物群落的影响,与除草剂的品种(或类型)和使用浓度、微生物的种类、土壤性质和实验条件等因素有关^[13, 76, 77]。要就除草剂对土壤生产力是否存在不良影响做出科学评价,有待于今后更广泛和深入的研究。

4 结语

无疑,化学除草剂在农业上的广泛使用为人类带来巨大的经济利益。然而,随之产生的一系列生产、社会和生态问题无不令人担忧。从环境保护和农业可持续发展的角度看,化学除草剂对农田生物群落的影响多数是消极的。但目前的研究还不够全面,以下几点研究得较少或未见报道,建议今后加强这方面的研究:

(1)多数化学除草剂可为植物的根、茎和叶等组织器官吸收,半衰期较长,且对高等脊椎动物具有慢性毒性和遗传毒性。因而残留在植株内的除草剂及其代谢产物可能会通过食物链和生物富集作用对农田动物群落各级消费者造成影响。这种影响具有隐蔽性强、潜在危害大、涉及范围广等特点。但这部分内容目前较少研究。因此,关于除草剂在食物链中的传递和富集情况,及其对植物-植食者-天敌 3 级营养关系的影响,应是今后研究的重点。

(2)作物生境天敌群落的重建和发展与其周围的非作物生境关系密切。当作物生境中的植被遭受破坏时,非作物生境可为从作物生境中迁出的天敌提供替代猎物或寄主,越冬和避难的场所;当作物生境中的植被恢复时,非作物生境可为作物生境天敌群落的重建提供种库(species pool)^[78]。但是,非作物生境施用除草剂对邻近作物生境内天敌群落重建的影响,以及作物生境使用除草剂对邻近非作物生境天敌群落的影响,这方面的研究尚未见报道。加强这部分研究可为协调杂草防除和害虫可持续控制之间的矛盾提供科学依据。

(3)土壤动物和微生物所需的营养物质和能量很大一部分依赖于植物的地下生物量。大量的研究表明,化学除草剂的长期使用会加速杂草群落演替、降低群落多样性、减少地表覆盖物和地下生物量。这种变化可能对土壤动物和微生物群落的物种组成及其分布和丰富度产生影响。但目前相关研究很少。加强这部分研究,可能有助于解释当前土壤贫瘠化的原因。

(4)在现代农田生态系统中,往往把不只一种农用化学品投入到农田中以提高产量。单种化学农用品对农田生物群落的影响已开展了大量的工作,但关于除草剂与杀虫剂、化肥等多种化学药剂对农田生物群落的联合作用的研究鲜见报道。这方面的研究应进一步开展。

References:

- [1] Zhang C X, Hu X E, Qian Y X. Trend of herbicides use in developed countries and current research and future directions in weed science research in china. *Acta Phytophy-lacica Sinica*, 1997, **24**(3): 278~282.
- [2] Huang J Z, et al. *Herbicide-resistance of weed in farmlands: mechanism, checking and determining methods*, IPM. Beijing: China Agricultural Press, 1995. 1~11.
- [3] Zhang C X, Qian Y X. Present situation and the goals of chemical weeding in farmland in china. *Plant Protection Technology and Extension*, 2001, **21**(10): 35~37.
- [4] Wu C H, Chen X. Impact of pesticides on biodiversity in agricultural areas. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(2): 341~344.
- [5] Zhang R W, Zhang H S, Zhang R A. *Chinese Environment Protection and Agricultural Sustainable Development*. Beijing: Beijing Publishing House, 2001. 183~234.
- [6] Vester J. The influence of herbicides on mammals and birds. In: Statens Planteavlsl- forsoeg, Lyngby (Denmark) ed., *Weed control in agriculture*. Lyngby, Denmark: Ukrudt- sbekaempelse i landbruget, 1990. 317~318.
- [7] Altman J. Herbicide-pathogen interactions in plant diseases. *Pesticide Outlook*, 1991, **2**(1): 17~21.

- [8] Delaunois A, Gustin P, Blaude M N, *et al.* Toxicity of herbicides in domestic animals. *Annales de Medecine Veterinaire* (Belgium), 1992, **136**(3): 181~192.
- [9] Edwards C A. Effects of herbicides on soil and surface-inhabiting invertebrates. In: *Brighton crop protection conference-weeds*. Farnham, UK: British Crop Protection Council, 1993. **1**: 133~138.
- [10] Heap I M. The occurrence of herbicide-resistant weeds worldwide. *Pesticide Science*, 1997, **51**(3): 235~243.
- [11] Kulshrestha G, Singh S B, Dhaliwal G S, *et al.* Ecological impact of herbicides: facts and challenges. In: Dhaliwal G. S., Arora R, Randhawa N S, eds. *Ecological agriculture and sustainable development*. Chandigarh, India: Centre for Research in Rural and Industrial Development, 1998. **2**: 552~561.
- [12] Heap I M. International survey of herbicide-resistant weeds: lessons and limitations. In: *Proceeding of the Brighton Crop Protection Conference-weeds*. Farnham, UK: British Crop Protection Council, 1999, **3**: 769~776.
- [13] Subhani A, El ghamry A M, Changyong H, *et al.* Effects of pesticides (herbicides) on soil microbial biomass-a review. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2000, **3**(5): 705~709.
- [14] Devine M D, Voss G, Ramos G. Weed resistance to herbicides: lessons learned and future directions. In: Voss G, ed. *Chemistry of crop protection: progress and prospects in science and regulation*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003. 155~163.
- [15] Hayes T B, Collins A, Lee M. Hermaphroditic, demasculinized frogs after exposure to the herbicide atrazine at low ecologically relevant doses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, **99**(8): 5476~5480.
- [16] Hayes T B, Haston K, Tsui M. Herbicides: feminization of male frogs in the wild. *Nature London*, 2002, **419**(6910): 895~896.
- [17] Wang Q A, Dong L R, Lou Y L, *et al.* Review on the herbicide resistance of weeds in crop and its checking and determining methods. *Weed Science*, 2002, (2): 1~5.
- [18] Chancellor R J. A review of long-term effects of herbicides: The long-term effects of herbicides on weed populations. *Annals of Applied Biology* (UK), 1979, **91**(1): 14~144.
- [19] Tu H L. The achievement, problem and countermeasure of weed chemical control at farmland during "8. 5". In: Zhang Z L, Piao Y F, Wu W J, eds. *Proceedings of the National Symposium on IPM in China*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1996. 1114~1116.
- [20] Zemanek J. The influence of annual applications of herbicides on the change of weed communities on ploughland. *Weed Abstract*, 1977, **26**(1): 13.
- [21] Feng W Z. Advance of fluctuation of the communities of weeds and their chemical control methods on rice field. *Pesticides*, 2000, **39**(3): 7~10.
- [22] Wu J R, Ji R L, Cui B B, *et al.* Effects of herbicides on weed community structures in cotton fields. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2001, **17**(1): 28~33.
- [23] Freemark K, Boutin C. Impacts of agricultural herbicide use on terrestrial wildlife in temperate landscapes: a review with special reference to North America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1995, **52**(2-3): 67~91.
- [24] Hibig W. Preservation of agrestal weeds. In: Holzener W, Numata M eds. *Biology and Ecology of Weeds*. W Junk publishers, 1982. 57~59.
- [25] Yu L Q, Lu Y L, Yasushi W, *et al.* Plant Diversity Research in Rice Field Habitat. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, **12**(3): 149~154.
- [26] Boutin C, Jobin B, Desgranges J L, *et al.* Modifications of field margins and other habitats in agricultural areas of Quebec, Canada, and effects on plants and birds. In: *Field margins: integrating agriculture and conservation*. Farnham, UK: British Crop Protection Council, 1994. 139~144.
- [27] Cheng X L, Wu J C, Ma F. *Brown planthopper: occurrence and control*. Beijing: China Agricultural Press, 2003. 255~258.
- [28] Yuan S Z, Wu J C, Xu J X, *et al.* Influences of herbicides on physiology and biochemistry of Rice. *Acta Phytophyllacica Sinica*, 2001, **28**(3): 274~278.
- [29] Zwolinska Snialatowa Z, Ruszkowska M, Bilska W. Observations on differences in the amino acid composition of winter wheat plant proteins as a feeding factor of aphids following herbicide application. *Materialy Sesji Instytutu Ochrony Roslin*, 1987, **27**(2): 55~59.
- [30] Grinstein A, Lisker N, Katan J, *et al.* Herbicide-induced resistance to plant wilt diseases. *Physiological Plant Pathology*, 1984, **24**(3): 347~356.
- [31] Zhang Y J, Sun H T, Lin G F. *Safe application of herbicides and a collection of illustrative plates in primitive color for diagnosis of herbicide-caused damages*. Beijing: Jindun Publishing House, 2002. 21~24.
- [32] Brighenti A M, Moraes V J, Oliveira Junior R S, *et al.* Persistence and phytotoxicity of the herbicide atrazine applied on corn crop on successive sunflower crop. *Planta Daninha*, 2002, **20**(2): 291~297.
- [33] Pizl V. Interactions between earthworms and herbicides 1. Toxicity of some herbicides to earthworms in laboratory tests. *Pedobiologia*, 1988, **32**(3-4): 227~232.
- [34] Khalil F A, Tadros M S. Influence of some herbicides on collembolan population occurring in soil cultivated with *Cladiolus hortulans*. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 1984, **20**(3): 101~107.
- [35] Chen J M, Yu X P, Lü Z X, *et al.* Toxic effects of herbicides and fungicides on adults of whitebacked planthopper, *Sogatella furcifera*

- Horvath. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1999, **11**(6): 293~396.
- [36] Chen J M, Yu X P, Lü Z X, *et al.* Effects of herbicides and fungicides on the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* and its predatory enemies. *Acta Phytophylacica Sinica*, 1999, **26**(2): 162~166.
- [37] Li G S, Xu J X, Wu J C, *et al.* Effects of herbicides on growth development and predatory function of *Pirata subpiraticus*. *Jiangsu Agricultural Research*, 2000, **21**(4): 41~44.
- [38] Ahn Y J, Kim Y J, Yoo J K, *et al.* Toxicity of the herbicide glufosinate- ammonium to predatory insects and mites of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) under laboratory conditions. *Journal of Economic Entomology*, 2001, **94**(1): 157~161.
- [39] Leius K. Influence of wildflowers on parasitism of tent caterpillar and codling moth. *Can. Entomol.*, 1967, **99**: 444~446.
- [40] Hald A B, Reddersen J. *Wildlife indicators: insects and wild plants*. Mijoministeriet: Mijostyrelsen, Copenhagen, 1990. 180.
- [41] Wu H Z, Wei C S, Kuai W X, *et al.* Structure of arthropod communities in tobacco fields with herbicide use. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2001, **28**(4): 372~375.
- [42] Haughton A J, Bell J R, Boatman N D, *et al.* The effects of different rates of the herbicide glyphosate on spiders in arable field margins. *Journal of Arachnology*, 1999, **27**(1): 249~254.
- [43] Haughton A J, Bell J R, Wilcox A, *et al.* The effect of the herbicide glyphosate on non-target spiders Part I. Direct effects on *Lepthyphantes tenuis* under laboratory conditions. *Pest Management Science*, 2001, **57**(11): 1033~1036.
- [44] Haughton A J, Bell J R, Boatman N D, *et al.* The effect of the herbicide glyphosate on non-target spiders Part II. Indirect effects on *Lepthyphantes tenuis* in field margins. *Pest Management Science*, 2001, **57**(11): 1037~1042.
- [45] Zhang Z B. Effects of agricultural chemicals on farmland ecosystem (2). *Journal of Ecology*, 1987(4): 30~34.
- [46] Dewar A M. Control of pests by manipulation of weeds in GM herbicide-tolerant sugar beet. In: *63e Congres Institut International de Recherches Betteravieres, Interlaken, Switzerland*. Brussels, Belgium: Institut International de Recherches Bettera- vieres, 2000. 187~198.
- [47] Honczarenko J, Karczewska G, Wolender M. Attempt to assess effects of herbicides used in lupin and field pea crops on occurrence of soil insects. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Szczecinie, Zootechnika*, 1982, **96**: 85~96.
- [48] Gope B, Borthakur M. Long term effects of herbicides on nematode population in tea soil. *Two and a Bud*, 1991, **38**(1-2): 37~38.
- [49] Edwards C A. Impact of herbicides on soil ecosystems. *CRC-Critical Reviews in Plant Sciences*, 1989, **8**(3): 221~257.
- [50] Edwards C A. Long-term ecological effects of herbicides: field studies. *Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference-Weeds*. Farnham, UK: British Crop Protection Council, 1991. (2): 883~890.
- [51] Kulshrestha G, Singh S B. Effect of herbicides on soil environment. In: Prasad D., Gaur H. S eds. *Soil Environment and Pesticides*. New Delhi, India: Venus Publishing House, 1994. 293~313.
- [52] Edwards C A. Impact of herbicides on soil ecosystems. *CRC-Critical Reviews in Plant Sciences*, 1989, **8**(3): 221~257.
- [53] Song J F. Chemical herbicides application in rice paddy pisciculture in Heilongjiang Province. *Heilongjiang Agriculture Science*, 1998, (2): 48~49.
- [54] Palkovics A. Toxic effect of at carbamid herbicide (Maloran 50 WP) on pheasant reproduction. *Novenyvedelem*, 2002, **38**(10): 519~523.
- [55] Moreby S J, Southway S E. Influence of autumn applied herbicides on summer and autumn food available to birds in winter wheat fields in southern England. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, **72**(3): 285~297.
- [56] Wilson J D, Morris A J, Arroyo B E, *et al.* A review of the abundance and diversity of invertebrate and plant foods of granivorous birds in northern Europe in relation to agricultural change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, **75**(1~2): 13~30.
- [57] Braae L, Noehr H, Petersen B S. *Environmental project, 102: a comparative study of the bird fauna in conventionally and organically farmed areas with special reference to the effects of pesticides*. Copenhagen, Denmark: Miljoestyrelsen, 1988. 116.
- [58] White J, Horskins K, Wilson J. The control of rodent damage in Australian macadamia orchards by manipulation of adjacent non-crop habitats. *Crop Protection*, 1998, **17**(4): 353~357.
- [59] Rippin M, Kasbohm A, Behr H C, *et al.* Organic market yearbook 2003: sale prices in organic agriculture 2001 and 2002. *Materialien zur Marktberichterstattung*, 2003, **44**: 254.
- [60] Zhu G N, Guo J F, Sun J H. studies on transfer, bioaccumulation and disappearance of glyphosate in the aquatic ecosystem by utilizing ¹⁴C trace technique. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2002, **16**(3): 185~190.
- [61] Altman J. Predisposition of sugarbeets to Rhizoctonia solani damping off with herbicides. *Phytopathology*, 1969, **59**: 1015.
- [62] Macedo E de C, Garcia B H, Chiba S. Effect of residual herbicides on in vitro development of the fungus causing Fusarium disease of cotton. *Biologico.*, 1984, **50**(5): 103~113.
- [63] Kim H T, Jang K S, Seo Y S, *et al.* Fungicidal effects of herbicides on several plant diseases and controlling effect of piperophos on rice blast caused by Pyricularia grisea. *Korean Journal of Plant Pathology* (Korea Republic), 1998, **14**(1): 28~33.
- [64] Song F M, Zheng Z. Effect and its mechanism of herbicides on plant diseases. *Plant Protection*, 1996, **22**(2): 40~42.
- [65] Altman J, Campbell C L. Effect of herbicides on plant diseases. *Annual Review of Phytopathology* (USA), 1977, **15**: 361~385.
- [66] Starratt A N, Lazarovits G. Herbicide-induced disease resistance and associated increases in free amino acid levels in melon plants.

Canadian Journal of Plant Pathology, 1999, **21**(1): 33~36.

- [67] Mekwatanakarn P, Sivasithamparam K. Effect of certain herbicides on soil microbial populations and their influence on saprophytic growth in soil and pathogenicity of take-all fungus. *Biology and Fertility of Soils*, 1987, **5**(2): 175~180.
- [68] He X S, Translation. Effects of herbicides on soil microorganisms. *Translated Collection of Pesticide*, 1989, **11**(3): 23~26.
- [69] Michalciewicz W. Effects of selected herbicides on biomass and abundance of soil microorganisms. *Rozprawy Akademia Rolnicza w Szczecinie*, 2001, **200**(92): 150.
- [70] Lu Z M, Min H, Ye Y Y. Effect of herbicide quinclorac on microbic populations in a paddy soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(4): 605~609.
- [71] Yu L Q, Xu F Q, Yu S K, *et al.* The Effect of Butachlor and Salurn on Actinomycetes and Streptomyces albus in Paddy Field. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, **30**(6): 81~83.
- [72] Yu L Q, Zhu Y L, Wu L F, *et al.* Effect of Herbicides and Their Mixture with Urea on Ammonifying Bacteria in Paddy Field. *Chinese Journal of Rice Science*, 1997, **11**(1): 44~46.
- [73] Shin Y S, Oh J H, Young S S, *et al.* Effect of herbicides on the survival of soyabean nodule bacteria (*Rhizobium japonicum*) in vitro. *Korean Journal of Crop Science*, 1989, **34**(1): 86~91.
- [74] Subbaiah H, Nanjappa H V, Balakrishna A N. Effect of herbicides on soil microbial biomass. *Crop Research Hisar*, 1994, **8**(1): 28~31.
- [75] Malkomes H P. Influence of dinitrophenol herbicides on microbial activities in the soil. *Agrokemia es Talajtan(Hungary)*, 1990, **39**(3~4): 321~324.
- [76] El Ghamry A M, Xu J M, Huang C Y. Influence of herbicides on microbial biomass and nitrogen mineralization in soils. *Journal of Zhejiang University Agriculture and Life Sciences*, 1999, **25**(6): 639~644.
- [77] Wardle D A, Rahman A. Side-effects of herbicides on the soil microbial biomass. In: *Proceedings of the 1st International Weed Control Congress*. Melbourne, Australia: Weed Science Society of Victoria, 1992. **2**: 561~564.
- [78] You M S, Hou Y M, Liu Y F, *et al.* Non-crop habitat manipulation and integrated pest management in agroecosystems. *Acta Entomologica Sinica*, 2004, **47**(2): 260~268.

参考文献:

- [1] 张朝贤, 胡祥恩, 钱益新. 国外除草剂应用趋势及我国杂草科学研究现状和发展方向. *植物保护学报*, 1997, **24**(3): 278~282.
- [2] 黄建中, 等. 农田杂草抗药性: 产生机理、测定技术、综合治理. 北京: 中国农业出版社, 1995. 1~11.
- [3] 张朝贤, 钱益新. 中国农田化学除草现状与努力方向. *植保技术与推广*, 2001, **21**(10): 35~37.
- [4] 吴春华, 陈欣. 农药对农区生物多样性的影响. *应用生态学报*, 2004, **15**(2): 341~344.
- [5] 张壬午, 张洪生, 张汝安. 中国环境保护与农业可持续发展. 北京: 北京出版社, 2001. 183~234.
- [17] 王庆亚, 董立尧, 姜远来, 等. 农田杂草抗药性及其检测鉴定方法. *杂草科学*, 2002, (2): 1~5.
- [19] 涂鹤龄. “八五”农田草害治理的重大成就、存在问题及对策. 见: 张芝利, 朴永范, 吴钜文主编. 中国有害生物综合治理论文集, 中国农业出版社, 1996. 1114~1116.
- [21] 冯维卓. 稻田杂草群落的变化和化除技术的进展. *农药*, 2000, **39**(3): 7~10.
- [22] 吴建荣, 吉荣龙, 崔必波, 等. 除草剂对棉田杂草群落结构的影响. *江苏农业学报*, 2001, **17**(1): 28~33.
- [25] 余柳青, 陆永良, 渡边泰, 等. 稻田环境植物多样性研究. *中国水稻科学*, 1998, **12**(3): 149~154.
- [27] 程遐年, 吴进才, 马飞. 褐飞虱研究与防治. 北京: 中国农业出版社, 2003. 255~258.
- [28] 袁树忠, 吴进才, 徐建祥, 等. 丁草胺等除草剂对水稻生理生化的影响. *植物保护学报*, 2001, **28**(3): 274~278.
- [31] 张玉聚, 孙化田, 林桂芬. 除草剂安全使用与药害诊断原色图谱. 北京: 金盾出版社, 2002. 21~24.
- [35] 陈建明, 俞晓平, 吕仲贤, 等. 除草剂和杀菌剂对白背飞虱的杀伤作用. *浙江农业学报*, 1999, **11**(6): 293~396.
- [36] 陈建明, 俞晓平, 吕仲贤, 等. 除草剂和杀菌剂对褐飞虱及其天敌的影响. *植物保护学报*, 1999, **26**(2): 162~166.
- [37] 李国生, 徐建祥, 吴进才, 等. 除草剂对拟水狼蛛生长发育及捕食功能的影响. *江苏农业研究*, 2000, **21**(4): 41~44.
- [41] 巫厚长, 魏重生, 蒯义兴, 等. 除草剂精克草能对烟田节肢动物群落的影响. *安徽农业大学学报*, 2001, **28**(4): 372~375.
- [45] 张宗炳. 农药对农田生态系统的影响(2). *生态学杂志*, 1987(4): 30~34.
- [53] 宋金福. 黑龙江省稻田养鱼除草剂应用. *黑龙江农业科学*, 1998(2): 48~49.
- [60] 朱国念, 郭江峰, 孙锦荷. 应用¹⁴C 核素研究草甘膦在水域生态系中的迁移、生物富集与消失动态. *核农学报*, 2002, **16**(3): 185~190.
- [64] 宋凤鸣, 郑重. 除草剂对植物病害的影响及其机制. *植物保护*, 1996, **22**(2): 40~42.
- [68] 何希树译. 除草剂对土壤微生物的影响. *农药译丛*, 1989, **11**(3): 23~26.
- [70] 吕镇梅, 闵航, 叶央芳. 除草剂二氯喹啉酸对水稻土壤中微生物种群的影响. *应用生态学报*, 2004, **15**(4): 605~609.
- [71] 余柳青, 徐福强, 俞圣康, 等. 丁草胺和杀草丹对稻田土壤放线菌及其白色链霉菌的影响. *中国农业科学*, 1997, **30**(6): 81~83.
- [72] 余柳青, 朱永林, 吴林福, 等. 除草剂及尿素混剂对稻田氨化细菌的影响. *中国水稻科学*, 1997, **11**(1): 44~46.
- [76] El Ghamry A M, 徐建民, 黄昌勇. 除草剂对土壤微生物生物量和氮矿化的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 1999, **25**(6): 639~644.
- [78] 尤民生, 侯有明, 刘雨芳, 等. 农田非作物生境调控与害虫综合治理. *昆虫学报*, 2004, **47**(2): 260~268.