

# 稻田排水及农药双脉冲输出特征及对策

陈诚<sup>1</sup>, 马勇<sup>2</sup>, 罗纨<sup>1\*</sup>, 张志秀<sup>2</sup>, 邹家荣<sup>1</sup>

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 扬州市江都区农田水利科学研究所, 江苏扬州 225261)

**摘要:**为识别稻田治虫灌溉后杀虫剂毒死蜱随排水的输出特征,开展了稻田及周边水体中毒死蜱浓度的高频监测研究。研究表明,治虫灌溉期间稻田排水和农药输出都呈现很强的脉冲性,其中大于5 L/s高流量的排水脉冲过程发生次数1年不超过10次,且均为地表径流造成。建议控制地表径流的发生,同时通过利用沟塘等田间滞留措施减少农药流失。

**关键词:**稻田; 治虫灌溉; 毒死蜱; 峰值浓度; 相位关系; 负荷

中图分类号: S19, X592 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2021)01-0001-05

## Characteristics and countermeasures of double pulse output of drainage and pesticide in paddy fields

CHEN Cheng<sup>1</sup>, MA Yong<sup>2</sup>, LUO Wan<sup>1\*</sup>, ZHANG Zhixiu<sup>2</sup>, ZOU Jiarong<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Farmland Water Conservancy Research Station of Jiangdu District, Yangzhou 225261, China)

**Abstract:** High frequency monitoring of chlorpyrifos concentration in paddy fields and surrounding water bodies was carried out to identify the output characteristics of chlorpyrifos insecticide along with drainage after pest control irrigation in paddy fields. The results showed that the drainage and pesticide output of the paddy field showed a strong pulse during pest control irrigation, and the drainage pulse process with a high flow of more than 5 L/s occurred no more than 10 times a year, all of which were caused by surface runoff. It is suggested that the occurrence of surface runoff should be controlled and the loss of pesticide should be reduced by means of field retention measures such as ditch and pond.

**Key words:** paddy fields; pest control irrigation; Chlorpyrifos; peak concentration; phase relation; load

水稻是我国主要的粮食作物之一,其稳产、高产是粮食安全的重要保证。而病虫害是影响水稻产量的一个重要因素,近年来在全球气候变化的影响下,气温升高和极端天气的增加导致了虫害发生时间提早、持续时间增长,危害性加重的趋势<sup>[1]</sup>。目前,抵御害虫的主要方法一般是在爆发区内统一进行防治,包括同步进行的集中灌溉和农药喷洒<sup>[2]</sup>。其中,集中灌溉是指在治虫时段内通过灌溉在田面形成3~5 cm的水层并维持4~5 d,以防止

害虫逃逸,提高治虫效果。由于灌溉时间集中,且与稻田水中农药浓度较高时期重叠,稻田在短时间内可形成浓度相对较高的排水脉冲过程<sup>[3]</sup>。如此大量的排水与农药输出过程可能对流域的生态环境造成重大危害。现有研究表明,受到农药特性的影响,脉冲过程差别很大。在较早研究中,樊德方等<sup>[4]</sup>发现排水沟塘中出现六六六峰值浓度的时间短暂,一般不会超过2~7 d;张晓群等<sup>[5]</sup>发现杀灭菊酯在稻田排水中的浓度高峰一般在1~2 d左右。

收稿日期:2020-08-24

基金项目:江苏省水利科技项目(2017052,2018052);国家自然科学基金(51979239)

作者简介:陈诚(1993—),男,博士研究生,研究方向为农业水资源管理与环境保护。E-mail: ydsicc@163.com

通讯作者:罗纨(1967—),女,教授,博士生导师,研究方向为农业水资源管理与环境保护。E-mail: luowan@yzu.edu.cn

随着监测技术的发展,人们对于农药脉冲输出形式有了更深的了解。Sangchan 等<sup>[6]</sup>采用1 h的采样间隔进行监测,发现积水状态最容易导致农药在较短时间内集中流失。Rothstei 等<sup>[7]</sup>研究发现,施用农药阿特拉金后,排水中农药的浓度与排水流量同步增加;一次农药集中输出事件中,农药浓度在3 d内降低了近100倍。Phong 等<sup>[8]</sup>也观察到农药浓度在4 d内下降了10倍。Wieczorek 等<sup>[3]</sup>发现绝大多数农药输出发生在施药后的6 h这一很短的时段内。

近年来,关于农药面源污染高频监测的研究在国外逐渐兴起,成为研究热点,但多关注流域性水体中的农药污染<sup>[9-10]</sup>,田间尺度研究相对较少;国内相关研究起步较晚,更鲜见关于稻田治虫灌溉杀虫剂的脉冲式输出特征研究。毒死蜱(chlorpyrifos)是一种广谱性有机磷杀虫剂,为水稻最常用的杀虫剂之一。目前有关毒死蜱在农田土壤中的归趋和降解的研究较多<sup>[11-13]</sup>,而关于其与农田排水的关系研究较少。本文以毒死蜱为例,通过大田监测试验确定治虫灌溉后的农田排水和农药输出脉冲过程,以为农药面源污染的控制提供科学依据。

## 1 材料与方 法

研究区为扬州市江都区农田水利科学研究所的试验田,采用稻麦轮作制,试验田如图1所示,总面积为1 ha (100 m×100 m),分为12个小田块,南北分别6个田块,除去田埂部分,南边田块的长均为46.3 m,各田块的宽共94.6 m;北边田块长为47.3 m,宽合计94.8 m,实际种植面积总计8 864 m<sup>2</sup>。12个田块在南北两侧与排水农沟毗邻处设有小的排水出口,可人工手动控制其开闭,西侧农沟不设排水出口。治虫灌溉期间,一般提前将出口关闭以满足泡田治虫需要。若遇强降雨天气致田间发生严重内涝,则适时打开出口,将田面水排入临近的排水农沟中。农沟采用目前江苏地区正在推广使用的无砂混凝土作为材质,透水性好。由于泡田期稻田的田间水位高于农沟水位,且农沟具有一定的透水性,故部分稻田水可通过浅层地下水进入农沟。同时,在施药期间及施药后的一定时期内,空气中的农药物质在风力飘移和大气沉降作用下直接进入农沟的这一运移路径亦不容忽视。2018年和2019年种植的水稻品种分别为南粳505和南粳3908,2个稻作期的重要农事活动具体见表1。

试验区于2018—2019年共计进行了4次治虫



图1 治虫灌溉期间杀虫剂水质监测取样点

灌溉。农药于施药当天现配现用,药液灌入农药喷雾器中待施。对2018年和2019年第1次治虫灌溉期间稻田田面水、地下水和农沟水3类水体中的毒死蜱浓度进行监测,2次施用量均为1 200 g/hm<sup>2</sup>,有效成分含量均为40%,剂型为乳油。施药结束后以最短0.5 h间隔在稻田田面水、地下水(2018年取水井深90 cm,2019年取水井深120 cm)和农沟水中取水样,立刻放置到冰箱中以-18℃进行保存,并于3 d内送至实验室进行分析。在稻田农沟末端设置三角堰,2018年和2019年控制排水深度分别为17.2 cm和24.3 cm。农沟发生出流期间直接取三角堰后的出流水样;未发生出流期间,则在三角堰前的农沟末端取表面水。在农沟末端放置水位计(HOBO, U20-001-04 Onset)测试农沟水位,并根据三角堰堰流公式计算农沟排水流量,进而结合毒死蜱浓度监测结果计算稻田农沟排水中的毒死蜱输出负荷和负荷强度。在稻田西侧不到100 m处安置自动气象站(高度约为3 m),对风速、风向、降水量、气温、气压、湿度、太阳辐射等多个气象要素以15 min间隔进行监测,用于分析气象条件对杀虫剂田间环境行为的影响,对研究区取样点示意图,见图1(数字1、2分别代表2018年、2019年采用的取样点)。毒死蜱分析方法可见参考文献[14]。

## 2 结果与分析

### 2.1 治虫灌溉后排水特征及地表排水的影响

图2显示了2018—2019年生长期近200 d的排水情况。排水过程,尤其是高流量过程具有鲜明的低频次脉冲特征,其中排水流量达到5 L/s仅有13次,且每次持续时间一般不超过1 h。同时需要特别指出的是,如果按照当地60~80 cm的明沟排水计算,在积水状态,农沟排水量不高于

表 1 研究区 2018—2019 年水稻种植期重要农事活动

日期	2018-05-26	2018-06-10	2018-06-15	2018-06-22	2018-07-07	2018-07-18	2018-07-28	2018-08-11	2018-09-02	2018-11-24
农事活动	育苗	施基肥、除草	插秧	施蘖肥	施穗肥	除草	施蘖肥	治虫灌溉	治虫灌溉	收割
日期	2019-05-17	2019-06-02	2019-06-06	2019-06-14	2019-07-27	2019-07-29	2019-09-01	2019-10-24		
农事活动	育苗	施基肥、除草	插秧	施蘖肥、除草	施穗肥	治虫灌溉	治虫灌溉	收割		

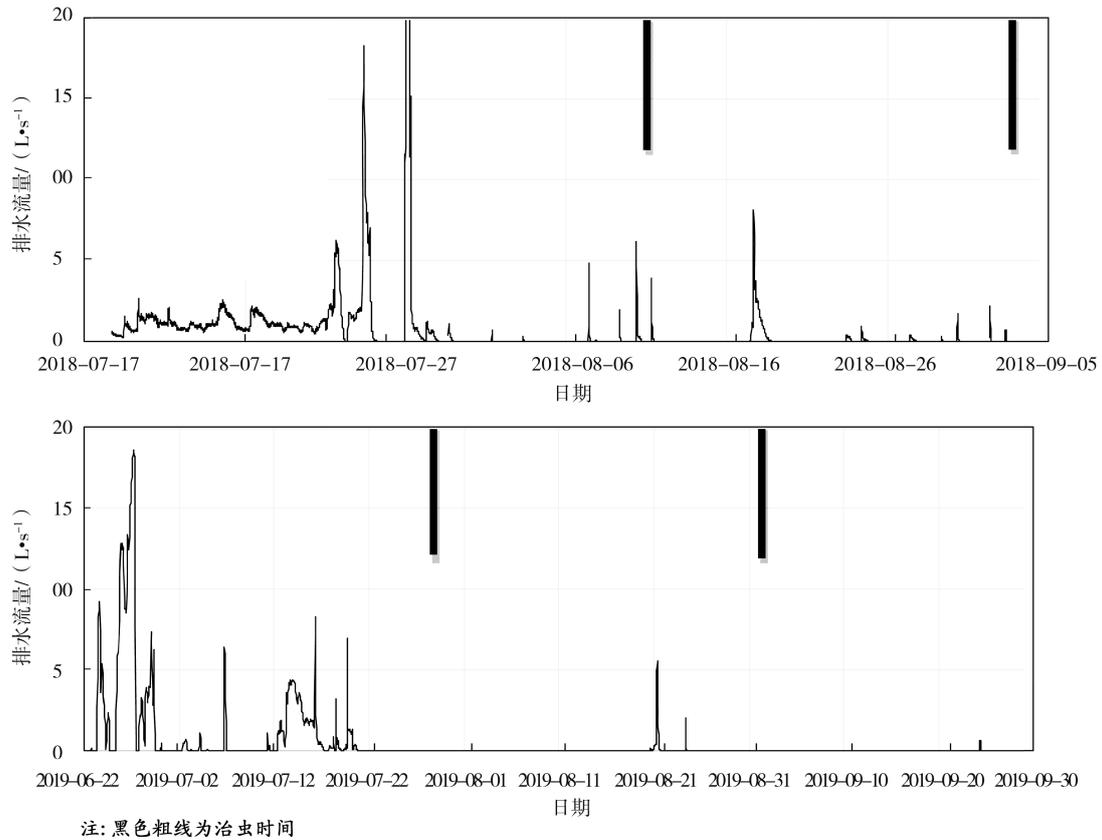


图 2 2018—2019 年稻作期农沟排水过程

1 L/s<sup>[15]</sup>, 那么可以推出上述排水脉冲主要是地表排水造成的。

参照表 1 的施药时间可以看出, 2018 年和 2019 年大的排水脉冲均没有发生在治虫期间。其中 2019 年治虫期间几乎没有发生排水。2018 年降雨高达 1 156 mm, 两次治虫期间都发生了排水。两次排水的排水量差别很大, 分别为 15.8 m<sup>3</sup> 和 2.1 m<sup>3</sup>, 分别占年总排水量的 0.49% 和 0.06%。7 月 22 日之前, 农沟水位较为稳定, 且一直有出流。7 月 23 日早首次出现三角堰断流的情况, 在此之后农沟水位变化迅速且变幅明显增大。说明 7 月 22 日之前, 田间灌溉较为频繁, 但灌溉量相对恒定。在 7 月 22 日之后, 由于水稻进入拔节孕穗期, 同时

也是水稻治虫期的开始。出于其生长的需要, 开始采用大灌大排的灌排方式, 使得农沟水位起伏一直较大, 呈现出脉冲式的农田排水输出方式。7 月 23 日之后, 不论长短共计出现 20 次出流, 最长的 1 次持续了 2 d 以上, 最短的 1 次仅持续几个小时。其中, 8 月 11 日治虫灌溉出流持续了近 6.8 h, 而 9 月 2 日治虫灌溉出流则仅持续 2.5 h。综上, 稻田治虫期的排水脉冲特征可以概括为: 历时短 (一般 < 1 d)、流量大 (1 ~ 4 L/s)、发生频 (40 几天发生 20 次)、间隔长 (最长可达 5 d)。上述脉冲式排水特征将对治虫灌溉期间的杀虫剂田间输出特征造成很大的影响。2019 年降水量仅为 662 mm, 大约是平均年份的 60%; 治虫灌溉没有产生可记录的排

水,其中的一个重要因素是沟道采用了控制排水措施,在田间排水量较小的情况下,排水滞留在排水沟中,没有形成有效排水。

## 2.2 治虫灌溉后稻田水体中农药浓度变化

图3显示了2次农药监测结果。以农沟末端毒死蜱监测结果为例,治虫灌溉之后,毒死蜱表现出类似的脉冲式输出特征,毒死蜱质量浓度上升期仅持续了0.5~2 h,于施药后1~2 h出峰(最大峰值浓度329  $\mu\text{g}/\text{L}$ ),其上升速率达30.3~133.9  $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ,2018年毒死蜱在高浓度水平维持了3 h后(此时农沟出流刚刚结束),浓度开始迅速下降,而2019年毒死蜱质量浓度则在出峰后立刻下降,下降速率达21.8~78.3  $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ,较上升速率相对更慢。之后毒死蜱质量浓度出现一定的波动,以2019年更为明显,甚至于施药后5、7 h出现了2个小的峰值(约为主峰浓度的50%不到)。至施药后24 h,毒死蜱质量浓度均下降至与施药刚刚结束时相当的水平,表明施药后1 d内是毒死蜱脉冲式输出的主要阶段,期间其流失风险最大。刘慧云等<sup>[16]</sup>测得稻田施药1 d后田面水中的毒死蜱质量浓度约为8.4  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,该浓度值介于本文2次施药后1 d的田面水毒死蜱质量浓度之间。本文2次高频监测测得的田面水毒死蜱峰值浓度分别为施药后1 d毒死蜱浓度的4.2倍和10.5倍,表明施药后1 d田面水的毒死蜱浓度可能会低于实际的峰值浓度,毒死蜱施用后1 d内进行高频监测是有必要的。

治虫灌溉过程中,稻田水体中毒死蜱质量浓度从高到低的地方分别为农沟末端、农沟中游、田面水和地下水。由于毒死蜱具有较强的挥发性,在风力漂移和大气沉降作用下,毒死蜱在施用后短期内会从田面上方的空气中直接进入农沟水体,造成了农沟水体中毒死蜱质量浓度沿程增加的现象;同时,相比于稻田田面水,农沟水的水体体积相对要小得多,在毒死蜱沉降量一定的情况下,农沟水中毒死蜱浓度容易变得更高,这使得农沟水浓度大于田面水成为了可能。2018年施药后12 h内农沟末端和田面水的毒死蜱平均质量浓度分别为197.1  $\mu\text{g}/\text{L}$ 和27  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,前者是后者的7.3倍;而2019年施药后12 h内农沟末端和田面水的平均质量浓度分别为4.90  $\mu\text{g}/\text{L}$ 和3.57  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,前者仅为后者的1.4倍。根据气象观测结果,2018年监测期间风向以东北风和东风为主,风主要由稻田向农沟吹;而2019年监测期间风向以西南风和西风为主,

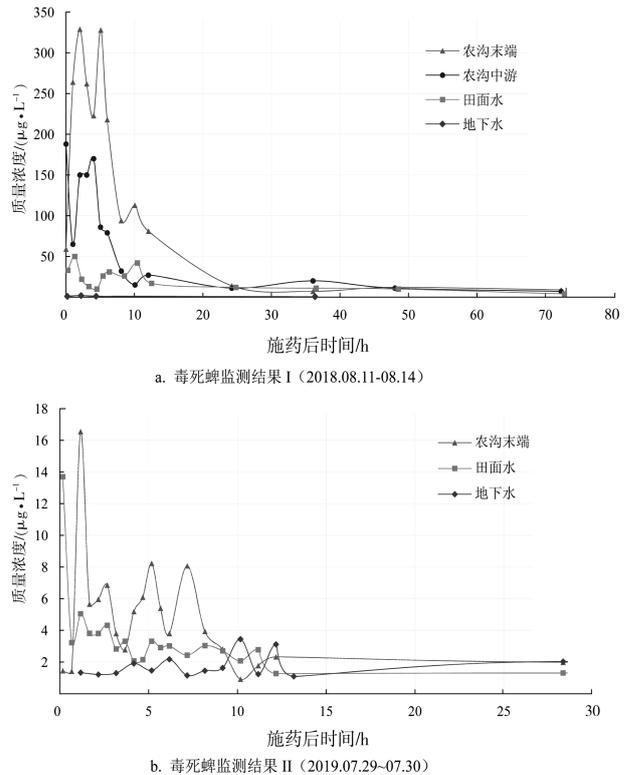


图3 2018—2019年治虫灌溉后稻田水体中毒死蜱质量浓度动态变化

风主要由农沟向稻田吹。上述气象条件的差别导致2018年毒死蜱的飘移沉降量相对更大,因而2018年农沟末端毒死蜱的浓度比田面水要高得多。治虫灌溉后地下水的毒死蜱浓度一直很低,这是由于土壤对毒死蜱的吸附性较强,使得毒死蜱在土壤中的迁移能力较低<sup>[8]</sup>。

因此,毒死蜱于施药后1~2 h内出现峰值(329  $\mu\text{g}/\text{L}$ ),但持续时间不超过3 h。建议在施药后1 d内采取控制排水措施防止其输出造成面源污染。治虫灌溉后,各类稻田水体中毒死蜱质量浓度从高到低分别为农沟末端、农沟中游、田面水和地下水,受风向影响的漂移和沉降作用对农沟中毒死蜱面源污染的发生影响较大,这为治虫灌溉导致的杀虫剂面源污染的发生带来了较大的不确定性因素,今后应考虑风向对治虫措施的不利影响。

## 3 结 论

农田排水与农药输出都具有鲜明的脉冲特征,而高浓度持续时间很短,高流量脉冲过程很少,且两者同时发生的概率很小。田间的干湿状况对于治虫期间排水发生有着显著的影响,干旱年份的沟塘和土壤都有着一定的储水能力,可以有效减少或是避免排水的发生。而湿润年份无论是从降雨发

生还是田间情况都可能会发生较大的排水。这对农药控制带来了挑战和机遇,挑战在于这些过程浓度较大,会对接纳水系统带来一定的威胁,同时持续时间较短的特征也为应对这些脉冲过程带来机会。考虑风力作用对沟道水的影响,在平原河网地区利用沟塘系统、结合控制排水措施可以有效滞留、稀释和降解浓度较高的农药。此外,目前的排水脉冲主要是由于地表排水造成的,应该加强田间管理,避免田间跑冒,形成较大的排水脉冲,造成农药流失。

#### 参考文献:

- [1] 赵梦,欧阳芳,张永生,等. 2000—2010年我国水稻病虫害发生[J]. 生物灾害科学, 2014, 37(4):275-280.
- [2] 张帅,李建洪,张绍明,等. 杀虫剂对长江中下游地区水稻害虫田间防效[J]. 农药, 2016, 55(7):530-535.
- [3] WIECZOREK M V, BAKANOV N, BILANCIA D, et al. Structural and functional effects of a short-term pyrethroid pulse exposure on invertebrates in outdoor stream mesocosms[J]. Science of the Total Environment, 610-611:810-819.
- [4] 樊德方,陈鹤鑫,陈忠明,等. 农药生态毒理研究(I)—稻田使用六六六后水源污染动态[J]. 浙江农业大学学报, 1984, 10(1):7-18.
- [5] 张晓群,张大弟,周建平,等. 杀灭菊酯对稻田-池塘生态系统的影响[J]. 上海农学院学报, 1989, 7(4):6-13.
- [6] SANGCHAN W, HUGENSCHMIDT C, INGWERSEN J, et al. Short-term dynamics of pesticide concentrations and loads in a river of an agricultural watershed in the outer tropics[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 158: 1-14.
- [7] ROTHSTEIN E, STEENHUIS T S, PEVERLY J H, et al. Atrazine fate on a tile drained field in northern New York: a case study[J]. Agricultural Water Management, 1996, 31(3):195-203.
- [8] PHONG T K, YOSHINO K, HIRAMATSU K, et al. Pesticide discharge and water management in a paddy catchment in Japan[J]. Paddy & Water Environment, 2010, 8(4):361-369.
- [9] LEFRANCQ M, JADAS - HÉCART A, LA JEUNESSE I, et al. High frequency monitoring of pesticides in runoff water to improve understanding of their transport and environmental impacts[J]. Science of the Total Environment, 587-588:75-86.
- [10] TANG T, STAMM C, VAN GRIENSVEN A, et al. Hysteresis and parent-metabolite analyses unravel characteristic pesticide transport mechanisms in a mixed land use catchment[J]. Water Research, 124:663-672.
- [11] 刘腾飞,邓金花,周峰杰,等. 毒死蜱在土壤中的降解及分析研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(9):26-34.
- [12] 薛南冬,刘寒冰,杨兵,等. 毒死蜱土壤环境行为研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(6):713-726.
- [13] 侯俊,王岩博,许伊,等. 微生物-物化耦合系统强化降解毒死蜱研究进展[J/OL]. 水资源保护:1-9 [2021-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20201209.1443.009.html>.
- [14] 陈诚,罗纨,邹家荣,等. 稻田水体中毒死蜱和阿维菌素监测及水生动物生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11):195-205.
- [15] 贾忠华,罗纨,方树星,等. 宁夏银南灌区排水现状分析及计算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3):60-65.
- [16] 刘慧云,关卓,程建华,等. 间歇灌溉对稻田毒死蜱迁移转化特征的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1):214-220.