

# 耕地园地农药药迹容量模型及其在综合风险评级中的应用

张志恒<sup>\*1</sup>, 汪雯<sup>1</sup>, 李慧杰<sup>1</sup>, 胡秀卿<sup>1</sup>, 肖青青<sup>2</sup>, 邓勋飞<sup>3</sup>

(1. 浙江省农业科学院农产品质量标准研究所/省部共建农产品质量安全国家重点实验室(筹)/农业农村部农产品质量安全风险评估重点实验室(杭州)/农业农村部农药残留检测重点实验室, 杭州 310021; 2. 合肥学院生物与环境工程系, 合肥 230601; 3. 浙江省农业科学院数字农业研究所, 杭州 310021)

**摘要:** 为评估耕地园地的农药药迹容量及农药使用带来的健康和环境方面的综合风险, 按照影响因素的代表性、影响机制的普适性、影响环节的关键性、影响效力的显著性、观测方法的标准化、已有观测的系统性和数据获取的便利性原则, 从影响农药对健康和环境危害的众多外部因子中, 选择年平均气温、年降水量、年日照时数、土壤质地及土壤有机质含量 5 个关键因子, 构建了耕地园地农药药迹容量模型:  $F_{ptc} = (T_{am} + 18) \times P_{am} \times H_{as} \times F_{st} \times C_{som} \times 10^{-9}$ 。结合运用耕地园地农药药迹容量模型和前期建立的农药药迹模型, 对家庭农场和区域尺度的耕地园地农药药迹容量和农药使用带来的综合风险进行了评估。结果显示: 2016—2017 年间, 4 个长江中下游稻区家庭农场耕地的药迹容量系数为 2.73~3.50, 综合风险指数为 0.56~1.77, 属中等风险或中低风险; 2017 年黑龙江垦区各分局的耕地园地农药药迹容量系数为 0.6~1.7, 风险指数为 3.3~7.3, 均属中高风险; 2017 年浙江省各地市的耕地园地农药药迹容量系数为 1.9~3.8, 风险指数在 4.7~12.6 之间, 除风险指数最高的嘉兴属高风险外, 其他各地市均属中高风险。研究表明, 所构建的耕地园地农药药迹容量模型可用于不同时空尺度耕地园地的农药药迹容量估算, 结合农药药迹模型可评估农药使用的综合风险, 具有普遍的适用性。

**关键词:** 耕地; 园地; 农药; 药迹容量; 评估模型; 综合风险; 健康影响; 环境危害

中图分类号: X82; TQ450.26 文献标志码: A 文章编号: 1008-7303(2019)5-6-0931-10

## Pesticide trace capacity model for planting land and its application in comprehensive risk rating

ZHANG Zhiheng<sup>\*1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, LI Huijie<sup>1</sup>, HU Xiuqing<sup>1</sup>, XIAO Qingqing<sup>2</sup>, DENG Xunfei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for Quality and Safety of Agro-products (in prepared) / Lab of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-products (Hangzhou), Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Key Lab for Pesticide Residue Detection, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Quality and Standard for Agro-products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. Department of Bicolological and Environmental Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China; 3. Institute of Digital Agriculture, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

收稿日期: 2019-08-12; 录用日期: 2019-09-03.

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0200803).

作者简介: \*张志恒, 通信作者(Author for correspondence), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全, E-mail: zhihengst@126.com

**Abstract:** In order to assess the pesticide trace capacity (PTC) and comprehensive health and environment risk from pesticide usage in planting land, a PTC model for planting land,  $F_{\text{ptc}} = (T_{\text{am}}+18) \times P_{\text{am}} \times H_{\text{as}} \times F_{\text{st}} \times C_{\text{som}} \times 10^{-9}$ , was constructed by five key factors, including annual mean temperature, annual precipitation, annual sunshine hours, soil texture, and soil organic matter content. Those factors were chosen from many external factors according several principles, including the representativeness of factors, the universality of mechanism, the critical of link, the significance of effect, the standardization of observation methods, the systematicness of existed observation and the convenience of data acquisition. The PTC model for planting land with pre-established pesticide trace model was used to evaluate the pesticide trace capacity and the comprehensive risk of pesticide usage on family farm and regional scale. The results showed that  $F_{\text{ptc}}$  (pesticide trace capacity factor) was 2.73-3.50 and  $I_{\text{cpr}}$  (comprehensive pesticide risk index) was 0.56-1.77, which posed low-medium risk for the cultivated lands of four family farms in the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2016–2017. In addition,  $F_{\text{ptc}}$  was 0.6-1.7 and  $I_{\text{cpr}}$  was 3.3-7.3, which posed medium-high risk for the planting lands in all branches in Heilongjiang reclamation area in 2017. Furthermore,  $F_{\text{ptc}}$  was 1.9-3.8, and  $I_{\text{cpr}}$  was 4.7-12.6 for the planting land in Zhejiang Province in 2017, indicating that all cities were medium-high risk while Jiaxing was high risk. This study showed that the PTC model can be widely used to estimate PTC of planting lands with different spatial and temporal scales. Combined with the pesticide trace model, it can also be used to estimate comprehensive risk from pesticide usage.

**Keywords:** planting land; pesticide; pesticide trace capacity; evaluation model; comprehensive risk; health impact; environment hazard;

自《寂静的春天》问世以来,人类对农药健康和环境危害的认识不断加深,农药监管力度不断加大,新农药安全标准不断提高,许多(并非所有)在《寂静的春天》中受到关注的农药已被替换。几十年的实践证明,农药的严格监管并未导致当时很多专家担忧的粮食减产、饥荒蔓延的情景<sup>[1]</sup>。然而,《寂静的春天》虽然改变了人类对农药的认识,但现代农业对农药的依赖性仍然强烈。全球农药使用量(按有效成分计,下同)仍持续了50多年的显著增加态势,至2012年突破了400万吨,并渐趋稳定。其中农药使用总量最大的中国和美国合计约占全球的1/2,单位土地面积每年使用量最大的马尔代夫、特立尼达和多巴哥、哥斯达黎加、巴哈马和巴巴多斯已经超过20 kg/hm<sup>2</sup><sup>[2-3]</sup>。大量田块和流域尺度的生态模拟研究,以及人群暴露和流行病学研究结果揭示,农药对人类健康和生态环境的影响仍然广泛存在<sup>[4-7]</sup>。

在可预见的将来,全球的农业生产仍然难以舍弃农药的投入,农药的正面和负面影响将会持续并存,而要实现农药更有效的管控,迫切需对其利弊进行量化的评估<sup>[3,8-9]</sup>。鉴于农药对健康和生态影响及区域性风险的复杂性和变异性,

对其进行量化评估是一项非常困难的工作。自20世纪90年代以来,已有学者从不同角度提出了多种农药有害影响量化评估的方法,但每种方法均各有其优缺点<sup>[3,8-13]</sup>:有些可能缺少反映某些重要自然过程的特定机制,如环境影响商(EIQ)等方法只根据农药有效成分的特性进行评估,未考虑气候和土壤等环境条件的影响<sup>[11-12]</sup>;有些在获取数据资源方面过于昂贵繁琐,如土壤和水域评估工具(SWAT)共有701个数学方程和1013个中间变量,涵盖气象、水文、泥沙迁移、土壤温度、作物生长、养分、农药和农业管理等多方面参数,很多数据需要专门调查监测获取<sup>[3]</sup>。笔者等利用农药有效成分特性数据资源,前期已经构建了农药药迹模型及其指标体系,可对农药的健康和环境影响进行量化概算和比较<sup>[14]</sup>。但农药的区域性风险还会受到气候状况、土壤条件、生物群落以及人类活动等其他多方面因素的影响,而这类影响在上述的各种量化评估方法中均少有考虑<sup>[8-14]</sup>。因此,本文拟针对农药的主要使用场所——耕地园地,选取对农药的健康和环境危害有重要影响的关键因子,构建耕地园地农药药迹容量模型,以期建立全面评估耕地园地农药综合

风险的方法。

### 1 耕地园地农药药迹容量模型的构建

#### 1.1 影响耕地园地农药健康和环境危害的关键因子分析

农药随着其生产和使用而进入环境，随后发生各种形式的扩散、迁移、稀释、富集和转化等过程<sup>[15]</sup>。在此过程中，农药将通过多种途径到达人体和各种环境生物的表面，通过体表吸收、呼吸吸入和膳食摄入等方式进入体内，并危害人和环境生物的健康。同时，农药自进入环境开始，也会发生各种形式的降解过程，根据是否有生物的参与，可分为生物降解和非生物降解，而生物降解、特别微生物降解是其中较为主要的方式，非生物降解则包括光解、水解和其他化学降解<sup>[16-17]</sup>。

除了农药本身的特性之外，农药在环境中的各种行为还受到一系列自然过程的显著影响，主要包括农药与各种有机体、土壤、水和大气的作用，这些相互作用又分别包含一系列复杂的生物、物理和化学过程，而所有这些过程又受到气候、土壤和生物群落等各类环境条件的影响<sup>[18]</sup>。针对在耕地园地中使用的农药，按照影响因素的代表性、影响机制的普适性、影响环节的关键性、影响效力的显著性、观测方法的标准化、已有观测的系统性和数据获取的便利性原则，在众多的影响因素中，筛选出下列 5 个关键因子用于构建耕地园地农药药迹容量模型。

1.1.1 气温 温度对农药在环境中的生物、物理和化学消解过程具有普遍的影响，在正常的环境温度范围内，通常较高的温度会加速农药的水解、光解和生物降解等过程<sup>[15-16]</sup>。

1.1.2 降水 降雨对农药可起到冲刷和稀释的作用，也为水解提供了条件，同时，充沛的降水也是当地生态系统中生物量增长的重要条件，生物量的增长可促进农药的生物降解和生物稀释<sup>[15-16]</sup>。

1.1.3 日照 光照是农药光解的重要条件，也是整个生态系统构建的基础，日照的长短与该区域生物量的增加、生命活动的强度和农药的生物降解活动存在密切的正相关性<sup>[16, 19]</sup>。

1.1.4 土壤质地 质地细黏的土壤具有较大的比表面积和较低的渗透性，水和农药在其中扩散的速度较慢，使得农药被土壤颗粒吸附的时间较长，而长期吸附在土壤颗粒上的农药将逐渐被风

化<sup>[15,18]</sup>。

1.1.5 土壤有机质 土壤有机质是在农药残留降解过程中发挥重要作用的微生物和植物的主要营养来源，有机质含量高的土壤，其活性微生物数量以及整个生态系统的生物量也更大，同时还可提高土壤对农药分子的吸附能力<sup>[15,18]</sup>。

#### 1.2 耕地园地农药药迹容量模型

基于上述影响耕地园地中农药对健康和环境危害的关键因子，所构建的耕地园地农药药迹容量模型见式 (1) 和 (2)。

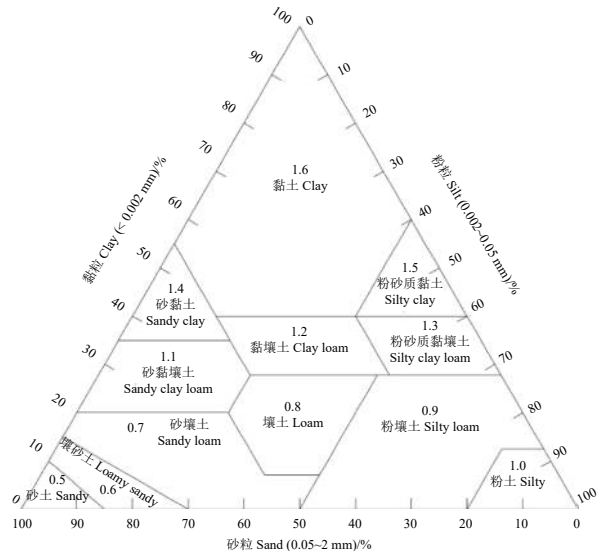
$$F_{ptc} = \frac{T_{am} + 18}{10 + 18} \times \frac{P_{am}}{650} \times \frac{H_{as}}{2\,200} \times \frac{F_{st}}{1} \times \frac{C_{som}}{25}$$

$$= \frac{(T_{am} + 18) \times P_{am} \times H_{as} \times F_{st} \times C_{som}}{1\,001\,000\,000}$$

$$\approx (T_{am} + 18) \times P_{am} \times H_{as} \times F_{st} \times C_{som} \times 10^{-9} \quad (1)$$

$$C_{pt} = F_{ptc} \times A_{pl} \quad (2)$$

式 (1) 中： $F_{ptc}$  为所评估耕地园地的药迹容量系数 (pesticide trace capacity factor)； $T_{am}$  为当地年平均气温 (annual mean temperature)，单位 °C； $P_{am}$  为当地年降水量 (annual precipitation)，单位 mm； $H_{as}$  为当地年日照时数 (annual sunshine hours)，单位 h； $F_{st}$  为土壤质地系数 (soil texture factor)，参照美国制分类标准 (图 1)； $C_{som}$  为土壤有机质含量 (soil organic matter content)，单位



注：土壤质地分类标准参照美国制<sup>[20]</sup>，每一格中的数值为该类土壤的质地系数。

Note: The classification standard of soil texture refers to the American system<sup>[20]</sup>, and the value in each cell is the texture coefficient of this kind of soil.

图 1 土壤质地分类与质地系数设定

Fig. 1 Soil texture classification and texture coefficient setting

g/kg。  $F_{ptc}$ 、  $T_{am}$ 、  $P_a$  和  $H_{as}$  优先采用当年的数据, 也可采用常年数据,  $C_{som}$  可采用当年或近年数据。18 为温度调整常数, 该常数是基于在  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  及以下温度条件下绝大多数农药基本不降解或降解极为缓慢<sup>[21]</sup> 这一规律得出的。10 为模式耕地园

地年平均气温设定值, 650 为模式耕地园地年降水量设定值, 2200 为模式耕地园地年日照时数设定值, 1 为模式耕地园地土壤质地系数设定值, 25 为模式耕地园地土壤有机质含量设定值, 具体见表 1。

表 1 模式耕地园地关键因子设定值及其参照依据

Table 1 The setting value of key factors of model planting land and its reference basis

关键因子 Key factor	设定值 Setting value	参照依据 Reference basis
年平均气温 Annual mean temperature	10 $^{\circ}\text{C}$	1981—2010 年全国平均为 9.55 $^{\circ}\text{C}$ , 2011—2018 年为 10.09 $^{\circ}\text{C}$ <sup>[22]</sup> 9.55 $^{\circ}\text{C}$ in 1981—2010 and 10.09 $^{\circ}\text{C}$ in 2011—2018 in China <sup>[22]</sup>
年降水量 Annual precipitation	650 mm	1981—2010 年全国平均为 630 mm, 2011—2018 年为 650 mm <sup>[22]</sup> 630 mm on average in 1981—2010 and 650 mm on average in 2011—2018 in China <sup>[22]</sup>
年日照时数 Annual sunshine hours	2200 h	中国的 2 200 小时线在北纬 35 $^{\circ}$ 及青藏高原和云贵高原东坡附近 <sup>[23]</sup> 2 200 hour line in China lies at 35 $^{\circ}\text{N}$ and near the eastern slope of the Qinghai-Tibet Plateau and Yunnan-Guizhou Plateau <sup>[23]</sup>
土壤质地系数 Soil texture factor	1	根据不同土壤质地类型分别设定为 0.5~1.6 (图 1) 0.5-1.6 according to different soil texture types (fig. 1)
土壤有机质含量 Soil organic matter content	25 g/kg	1979—1994 年全国平均为 18.63 g/kg; 1995—2012 年为 26.11 g/kg <sup>[24]</sup> 18.63 g/kg on average in 1979—1994 and 26.11 g/kg on average in 1995—2012 in China <sup>[24]</sup>

式 (2) 中:  $C_{pt}$  为该耕地园地的药迹容量 (pesticide trace capacity), 单位 PCU;  $A_{pl}$  为耕地园地面积 (planting land area), 单位  $\text{hm}^2$ 。

### 1.3 耕地园地农药综合风险指数与分级标准

针对拟评估的不同时空尺度下的耕地园地, 基于该耕地园地的药迹容量系数和面积, 以及全年投入到该耕地园地的全部农药的药迹总量, 可通过公式 (3) 计算得到该耕地园地的农药综合风险指数。

$$I_{cpr} = \frac{T_{ap}}{F_{ptc}} \quad (3)$$

式中:  $I_{cpr}$  为耕地园地农药综合风险指数 (comprehensive pesticide risk index);  $T_{ap}$  为该耕地园地全年农药使用产生的药迹 (annual pesticide trace), 单位为  $\text{PTU}/\text{hm}^2$ 。

根据所评估耕地园地的农药综合风险指数和表 2 的分级标准, 可对该耕地园地的农药综合风险进行分级。

## 2 农药药迹容量模型在耕地园地综合风险评级中的应用

### 2.1 家庭农场尺度的农药药迹容量和综合风险评级

采用所构建的耕地园地农药药迹容量模型, 评估了长江中下游稻区 4 个水稻家庭农场的药迹容量和综合风险, 这 4 个农场分别位于该区域的东部、中部和西部。药迹容量系数计算结果见

表 3, 其中以位于安徽省铜陵市义安区天门镇的农场 C 的药迹容量系数值相对较大, 为 3.50, 其他 3 个农场均在 2.73~2.86 之间。

4 个农场的周年茬口安排均为绿肥紫云英加一季水稻, 在水稻生长期使用农药, 紫云英生长期未使用。其中, 农场 A 在 2016 年内共施药 5 次, 用了 9 种农药有效成分, 其中 3 种使用 2 次, 每公顷共投入农药有效成分 1 284 g, 药迹

表 2 耕地园地农药综合风险分级标准

Table 2 Classification standard of comprehensive risk for pesticides in planting lands

等级 Grade	级别名称 Grade name	农药综合风险指数 Comprehensive pesticide risk index
1	极高风险 Extremely high risk	>100
2	超高风险 Ultrahigh risk	30~100
3	高风险 High risk	10~30
4	中高风险 Higher risk	3~10
5	中等风险 Medium risk	1~3
6	中低风险 Lower risk	0.3~1
7	低风险 Low risk	0.1~0.3
8	超低风险 Ultralow risk	0.1~0.03
9	极低风险 Extremely low risk	< 0.03

表 3 长江中下游稻区 4 个水稻家庭农场的农药药迹容量与综合风险

Table 3 Pesticide trace capacity and comprehensive risk for 4 rice family farms in the middle and lower reaches of the Yangtze River

农场* 年份 Farm* Year	年平均气温 Annual mean temperature/ °C	年降水量 Annual precipitation/ mm	年日照时数 Annual sunshine hours/h	土壤质地系数 <sup>[28]</sup> Soil texture factor <sup>[28]</sup>	土壤有机质质量分数 Soil organic matter content/(g/kg)	药迹容量系数 Pesticide trace capacity factor	耕地面积 Planting land area/hm <sup>2</sup>	药迹容量 Pesticide trace capacity/ PCU	全年药迹 Annual pesticide trace/ (PTU/hm <sup>2</sup> )	农药风险指数 Pesticide risk index	风险分级 Risk grade
A 2016	15.9 <sup>[25]</sup>	1 128 <sup>[25]</sup>	1 973 <sup>[25]</sup>	0.9	42.1	2.86	2.00	5.72	1.615	0.56	6
B 2016	15.9 <sup>[25]</sup>	1 128 <sup>[25]</sup>	1 973 <sup>[25]</sup>	0.9	42.1	2.86	0.93	2.66	5.047	1.77	5
C 2016	16.4 <sup>[26]</sup>	1368 <sup>[26]</sup>	1906 <sup>[26]</sup>	1.1	35.5	3.50	66.67	233.52	4.577	1.31	5
D 2017	16.9 <sup>[27]</sup>	1 465 <sup>[27]</sup>	1 560 <sup>[27]</sup>	1.1	31.1	2.73	0.20	0.55	1.843 <sup>[14]</sup>	0.68	6

\*农场 A 和 B 均位于上海市崇明区海桥镇, 相互比邻, 但分别由不同农户经营; 农场 C 位于安徽省铜陵市义安区天门镇; 农场 D 位于湖南省益阳市赫山区兰溪镇。

\* Farms A and B are located in Haiqiao Town, Chongming District, Shanghai City, and are operated by different farmers; Farm C is located in Tianmen Town, Yi'an District, Tongling City, Anhui Province; Farm D is located in Lanxi Town, Heshan District, Yiyang City, Hunan Province.

为 1.615 PTU(表 4); 农场 B 在 2016 年内共施药 5 次, 用了 12 种农药有效成分, 其中 4 种使用 2 次, 每公顷共投入农药有效成分 1 822 g, 药迹为 5.047 PTU, 其中毒死蜱贡献了 3.186 PTU(表 4), 占 63%; 农场 C 在 2016 年内共施药 5 次, 用了 11 种农药有效成分, 其中 1 种使用 3 次, 5 种使用 2 次, 每公顷共投入农药有效成分 2 797 g, 药迹为 4.423 PTU, 其中稻瘟灵贡献了 2.059 PTU(表 4), 占 47%; 农场 D 在 2017 年内共施药 5 次, 用了 8 种农药有效成分, 其中 3 种使用 3 次, 1 种使用 2 次, 每公顷共投入农药有效成分 1 635 g, 药迹为 1.843 PTU<sup>[14]</sup>。

综合风险评估结果表明, 农场 A 和 D 的风险指数分别为 0.56 和 0.68, 属于 6 级(中低风险); 农场 B 和 C 的风险指数分别为 1.77 和 1.31, 属于 5 级(中等风险)(表 3)。

## 2.2 区域尺度的农药药迹容量和综合风险评级

采用所构建的耕地园地农药药迹容量模型, 分别评估了黑龙江垦区各分局(表 5)和浙江省各地市(表 6)的耕地园地农药药迹容量和综合风险。黑龙江垦区各分局的耕地园地农药药迹容量系数为 0.6~1.7, 其中最大的是绥化分局, 主要因其耕地园地有机质含量明显较高, 降水量相对较大; 药迹容量系数最小的齐齐哈尔分局则正好相反, 耕地园地有机质含量明显较低, 降水量相对较小; 九三分局由于气温、降水量和土壤有机质含量相对较低等原因, 其药迹容量系数也比较小。黑龙江垦区整体的农药综合风险指数为 5.2, 各分局的风险指数在 3.3~7.3 之间, 风险分级均为 4 级(中高风险)。风险最大的是九三分局和建

三江分局, 风险指数分别为 7.3 和 7.1, 其中九三分局主要是由于耕地园地农药药迹容量系数较小, 而建三江分局主要是由于单位面积农药用量较大; 风险最小的是绥化分局, 主要是由于其药迹容量系数较大(表 5)。

浙江省各地市的耕地园地农药药迹容量系数为 1.9~3.8, 其中最大的是绍兴市, 主要因其土壤有机质含量相对较高, 降水量较大, 土壤质地偏黏性; 药迹容量系数最小的是金华和舟山, 主要因土壤有机质含量较低, 土壤质地偏砂性。浙江省整体的农药综合风险指数为 6.9, 各地市风险指数在 4.7~12.6 之间, 除风险指数最高的嘉兴为 3 级(高风险)外, 其他各地市均属 4 级(中高风险)。嘉兴市农药综合风险高主要是因其单位面积的农药用量显著高于其他地市, 同时, 其耕地园地的药迹容量系数也相对偏低(表 6)。

## 3 结论与讨论

1) 前期建立的农药药迹模型已经提供了分析农药有效成分自身特性与其对健康和环境危害之间关系的工具<sup>[14]</sup>, 但针对特定的耕地园地, 这种危害性同时也受到该区域众多外部因子的显著影响。在这些外部因子中, 按照影响因素的代表性、影响机制的普适性、影响环节的关键性、影响效力的显著性、观测方法的标准化、已有观测的系统性和数据获取的便利性原则, 选择年平均气温、年降水量、年日照时数、土壤质地及土壤有机质含量 5 个关键因子, 构建了耕地园地农药药迹容量模型。该模型可用于不同时空尺度的耕地园地农药药迹容量估算, 具有普遍的适用性。

表 4 2016 年 3 个水稻家庭农场的农药使用和药迹核算

Table 4 Pesticide application and pesticide trace accounting for 3 rice family farms in 2016

农药 Pesticide	药迹指数 <sup>[14]</sup> Pesticide trace index <sup>[14]</sup> (PTU/kg)	使用次数 Number of applications			有效成分用量 Application amount, a.i./(g/hm <sup>2</sup> )			药迹 Pesticide trace/(PTU/hm <sup>2</sup> )		
		A*	B*	C*	A*	B*	C*	A*	B*	C*
苄嘧磺隆 Bensulfuron-methyl bensulfuron	0.061	1	1	0	30	60	0	0.002	0.004	0
丙草胺 Pretilachlor	0.749	1	1	0	270	540	0	0.202	0.404	0
茚虫威 Indoxacard	2.869	1	1	0	36	54	0	0.103	0.155	0
甲维盐 Emamectin benzoate	0.735	2	2	0	7.5	18	0	0.006	0.013	0
己唑醇 Hexaconazole	5.508	2	1	0	22.5	11.25	0	0.124	0.062	0
井冈霉素 Jinggangmycin A	0.003	2	1	0	76.5	38.25	0	0	0	0
毒死蜱 Chlorpyrifos	44.253	0	2	0	0	72	0	0	3.186	0
吡虫啉 Imidacloprid	1.488	0	2	0	0	7.2	0	0	0.011	0
吡蚜酮 Pymetrozine	0.191	0	2	3	0	180	267	0	0.034	0.051
三环唑 Tricyclazole	1.861	1	1	2	337.5	337.5	506.25	0.628	0.628	0.942
甲基硫菌灵 Thiophanatemethyl	0.479	1	1	0	420	420	0	0.201	0.201	0
咪鲜胺 Prochloraz	4.146	1	1	0	84	84	0	0.348	0.348	0
阿维菌素 Abamectin	1.846	0	0	2	0	0	24	0	0	0.044
氯氰菊酯 Cypermethrin	3.679	0	0	2	0	0	144	0	0	0.530
苯醚甲环唑 Difenoconazole	3.803	0	0	2	0	0	101.25	0	0	0.385
啶菌酯 Azoxystrobin	0.104	0	0	1	0	0	67.5	0	0	0.007
苏云芽孢金杆菌 <i>Bacillus thuringiensis</i>	0.002	0	0	2	0	0	792	0	0	0.002
丙环唑 Propocon-azol	1.059	0	0	1	0	0	56.25	0	0	0.060
稻瘟灵 Isoprothiolane	3.432	0	0	1	0	0	600	0	0	2.059
戊唑醇 Tebuconazole	2.025	0	0	1	0	0	120	0	0	0.243
噻呋酰胺 Thifluzamide	0.844	0	0	1	0	0	118.8	0	0	0.100
合计 Sum	—	12	16	18	1 284	1 822	2 797	1.615	5.047	4.423

\*农场 A 和 B 均位于上海市崇明区海桥镇，相互比邻，但分别由不同农户经营；农场 C 位于安徽省铜陵市义安区天门镇。

\* Farms A and B are located in Haiqiao Town, Chongming District, Shanghai City, and were operated by different farmers; Farm C is located in Tianmen Town, Yi'an District, Tongling City, Anhui Province.

2) 为了尽量降低农药对人类健康和生态环境的不利影响，很多国家都在致力于减少农药使用量<sup>[9]</sup>。2015 年，中国原农业部发布了“到 2020 年农药使用量零增长行动方案”<sup>[34]</sup>，2016 年，科技部启动了“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”试点专项，其中的一个重要内容即是研究提出化学农药施用限量标准<sup>[35]</sup>。但目前各国的农药使用

监测统计和政策导向均主要采用纯使用量维度的各种指标，这可能导致农药使用者在选择农药品种时只关注高效而忽略安全性的不良后果<sup>[9]</sup>。因此，笔者认为，对“农药减施”的理解不能仅仅停留在农药使用量的减少上，而应紧紧围绕“减害”这个根本目的，即从“农药减施”升级为“农药减害”。将本文建立的耕地园地农药药迹容量模型与

表 5 2017 年黑龙江垦区各分局的耕地园地农药药迹容量及综合风险评级  
Table 5 Pesticide trace capacity and comprehensive risk rating for planting land in each branch of Heilongjiang reclamation area in 2017

垦区分局 Branch	年平均 气温 Annual mean temperature <sup>[29]</sup> / °C	年降水量 <sup>[29]</sup> Annual precipitation <sup>[29]</sup> / mm	年日照时数 <sup>[29]</sup> Annual sunshine hours <sup>[29]</sup> /h	土壤质地 系数 <sup>[28]</sup> Soil texture factor <sup>[28]</sup>	土壤有机质 含量 <sup>[30]</sup> Soil organic matter content <sup>[30]</sup> /(g/kg)	药迹容量 系数 Pesticide trace capacity factor	耕地园地 面积 <sup>[29]</sup> Planting land area <sup>[29]</sup> /hm <sup>2</sup>	药迹容量 Pesticide trace capacity/ PCU	农药总 使用量 <sup>[29]</sup> Total pesticide usage <sup>[29]</sup> /t	全年药迹* Annual pesticide trace/ (PTU/hm <sup>2</sup> )	农药 风险指数 Pesticide risk index	风险等级 Risk grade
宝泉岭 Baoquanling	3.7	622	2321	0.9	40.1	1.1	341 755	386 391	1 389	4.1	3.6	4
红兴隆 Hongxinglong	4.1	488	2 113	0.8	51.9	0.9	493 728	467 150	2 598	5.3	5.6	4
建三江 Jiansanjiang	4.1	421	2 315	0.8	55.0	0.9	760 865	721 084	5 094	6.7	7.1	4
牡丹江 Mudanjiang	4.8	478	2 545	0.8	51.5	1.1	467 271	533 970	2 048	4.4	3.8	4
北安 Beian	2.2	522	2 430	0.8	56.1	1.1	335 103	385 354	1 680	5.0	4.4	4
九三 Jiusan	1.7	421	2 432	0.8	44.2	0.7	252 755	180 270	1 313	5.2	7.3	4
齐齐哈尔 Qiqihar	2.7	349	2 628	0.9	37.8	0.6	147 004	94 948	558	3.8	5.9	4
绥化 Suihua	2.8	676	2 163	0.8	68.9	1.7	92 815	155 594	513	5.5	3.3	4
哈尔滨 Harbin	5.1	481	2 277	0.8	58.3	1.2	26 239	30 962	135	5.1	4.4	4
合计 Sun							2 917 535	2 955 722	15 328	5.3	5.2	4

\*因缺少农药分品种使用量数据, 全年药迹按平均药迹指数 1 PTU/kg 估算。

\* Pesticide trace was estimated by the average pesticide trace index of 1 PTU/kg due to the lack of respective application amount data for kinds of pesticides.

表 6 2017 年浙江省各地市的耕地园地农药迹容量及综合风险评级

Table 6 Pesticide trace capacity and comprehensive risk rating for planting land in each city of Zhejiang Province in 2017

地市 City	年平均 气温 <sup>[31]</sup> Annual mean temperature <sup>[31]</sup> / °C	年降水量 <sup>[31]</sup> Annual precipitation <sup>[31]</sup> / mm	年日照 时数 <sup>[31]</sup> Annual sunshine hours <sup>[31]</sup> /h	土壤质地 系数 <sup>[28]</sup> Soil texture factor <sup>[28]</sup>	土壤有机质 含量 <sup>[3]</sup> Soil organic matter content <sup>[3]</sup> /(g/kg)	药迹容量 系数 Pesticide trace capacity factor	耕地园地 面积 <sup>[3]</sup> Planting land area <sup>[3]</sup> /hm <sup>2</sup>	药迹容量 Pesticide trace capacity/PCU	农药总 使用量 <sup>[31]</sup> Total pesticide usage <sup>[31]</sup> /t	全年药迹* Annual pesticide trace/ (PTU/hm <sup>2</sup> )	农药风险 指数 Pesticide risk index	风险等级 Risk grade
杭州 Hangzhou	18.2	1 442	1 818	1.1	27.8	2.9	310 999	902 535	6 632	21.3	7.3	4
宁波 Ningbo	18.2	1 506	1 772	1.0	29.2	2.8	262 654	740 908	5 713	21.8	7.7	4
温州 Wenzhou	19.7	1 370	1 492	1.1	33.0	2.8	273 345	764 625	3 789	13.9	5.0	4
嘉兴 Jiaxing	17.8	1 367	1 741	0.9	27.4	2.1	224 964	472 668	5 977	26.6	12.6	3
湖州 Huzhou	17.6	1 267	1 862	1.0	29.4	2.5	201 510	497 565	3 760	18.7	7.6	4
绍兴 Shaoxing	18.7	1 582	1 855	1.0	35.0	3.8	260 423	981 666	5 771	22.2	5.9	4
金华 Jinhua	19.2	1 381	1 816	0.8	25.7	1.9	293 241	562 471	4 690	16.0	8.3	4
衢州 Quzhou	18.7	1 567	1 785	0.9	24.7	2.3	222 331	507 356	3 785	17.0	7.5	4
舟山 Zhoushan	17.8	1 375	1 957	0.8	24.9	1.9	25 238	48 431	447	17.7	9.2	4
台州 Taizhou	18.5	1 191	1 951	1.0	30.6	2.6	249 797	648 292	3 053	12.2	4.7	4
丽水 Lishui	19.6	1 313	1 529	1.1	28.7	2.4	226 807	540 494	2 686	11.8	5.0	4
合计 Sun							2 551 309	6 667 012	46 303	18.1	6.9	4

\*因缺少农药分品种使用量数据, 全年药迹按平均药迹指数 1 PTU/kg 估算。

\* Pesticide trace was estimated by the average pesticide trace index of 1 PTU/kg due to the lack of respective application amount data for kinds of pesticides.



前期建立的农药药迹模型<sup>[14]</sup>结合, 可对不同时空尺度耕地园地中农药使用带来的健康和环境风险进行综合评估, 并根据获得的综合风险指数及相应的分级标准进行风险分级。该风险分级评估结果可用于管理部门对下级行政区的农药减害达标考核, 也可用于对相关示范基地、农业龙头企业或家庭农场的减害达标考核。这种考核机制的建立, 将有效推动“农药减施”向“农药减害”的升级进程, 更有效地管控农药对人类健康和生态环境的不利影响。

3) 对长江中下游稻区 4 个家庭农场以及黑龙江垦区各分局和浙江省各地市耕地园地的农药药迹容量和综合风险评估结果显示, 不同区域耕地园地的农药药迹容量系数具有显著差异, 浙江地区的耕地园地农药药迹容量系数总体上显著大于黑龙江垦区, 但由于浙江地区单位土地面积的用药量显著大于黑龙江垦区, 因此其综合风险指数仅略高于黑龙江垦区。结合 4 个家庭农场的农药使用和风险分析显示, 在类似环境条件下, 农药多品种滥混滥用以及采用一些高危害性的农药品种, 是推高农药风险的主要原因。因此, 通过管控农药滥用, 合理选择低风险品种, 可大幅降低耕地园地的农药综合风险。

4) 影响农药对健康和环境危害的外部因子众多, 影响机制复杂, 本文构建的耕地园地农药药迹容量模型只是基于对这种影响的现有认识水平, 以及国内外对相关因子的系统观测和数据积累现状, 按照可靠性和可行性适当平衡的原则构建完成的。随着认识水平的深化和观测数据资源的增加, 可对该模型进行进一步的优化。例如在条件基本成熟时, 可考虑将作物类型以及生产过程的机械化、自动化和信息化等因素纳入其中。

5) 在结合运用耕地园地农药药迹容量模型与农药药迹模型进行耕地园地农药使用的综合风险评估时, 气候、土壤和农药特性等方面输入参数通常都有系统的观测和试验结果, 数据获取比较容易; 目前相对比较困难的是不同时空尺度下的农药分品种使用量数据, 很多地区只统计农药使用总量, 缺少分品种的数据。令人欣慰的是, 中国系统性的“农药使用监测调查”<sup>[36]</sup>与“农药生产、流通和使用双向全链条可追溯体系建设”<sup>[37]</sup>已经开始试点及在有序推进之中, 相信在不久的将来, 中国各地系统性的分品种农药使用数据库就会形

成。目前在使用耕地园地农药药迹容量模型与农药药迹模型时, 如暂时缺少农药分品种使用量数据, 也可先根据农药品种结构的大概情况, 确定一个平均药迹指数来进行估算。

### 作者简介:



张志恒, 男, 1982 年毕业于浙江农业大学植物保护系, 现在浙江省农业科学院工作, 任农产品质量标准研究所首席专家、研究员, 《农药学报》编委。主要从事农药等危害因子的风险评估、农产品安全生产技术和标准化研究, 获省级科学技术奖 5 项, 其中第一完成人 2 项。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] EPSTEIN L. Fifty years since Silent Spring[J]. *Annu Rev Phytopathol*, 2014, 52(1): 377-402.
- [ 2 ] FAO. Pesticides use[DB/OL]. [2019-07-29]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>
- [ 3 ] WANG R, YUAN Y, YEN H, et al. A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 669: 512-526.
- [ 4 ] WEE S Y, ARIS A Z. Ecological risk estimation of organophosphorus pesticides in riverine ecosystems[J]. *Chemosphere*, 2017, 188: 575-581.
- [ 5 ] TRIASSI M, NARDONE A, GIOVINETTI M C, et al. Ecological risk and estimates of organophosphate pesticides loads into the Central Mediterranean Sea from Volturno River, the river of the “Land of Fires” area, southern Italy[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 678: 741-754.
- [ 6 ] OSBORNE N J, CAIRNS R, DAWSON A H, et al. Epidemiology of coronial deaths from pesticide ingestion in Australia[J]. *Int J Hyg Environ Heal*, 2017, 220: 478-484.
- [ 7 ] ROUSIS N I, ZUCCATO E, CASTIGLIONI S. Wastewater-based epidemiology to assess human exposure to pyrethroid pesticides[J]. *Environ Int*, 2017, 99: 213-220.
- [ 8 ] FANTKE P, FRIEDRICH R, JOLLIET O. Health impact and damage cost assessment of pesticides in Europe[J]. *Environ Int*, 2012, 49: 9-17.
- [ 9 ] MÖHRING N, GABA S, FINGER R. Quantity based indicators fail to identify extreme pesticide risks[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 646: 503-523.
- [ 10 ] KUDSK P, JØRGENSEN L N, ØRUM J E. Pesticide load: a new Danish pesticide risk indicator with multiple applications[J]. *Land Use Policy*, 2018, 70: 384-393.
- [ 11 ] STENRØD M, HEGGEN H E, BOLLI R I, et al. Testing and comparison of three pesticide risk indicator models under Norwegian conditions: a case study in the Skuterud and Heiabekken catchments[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2008, 123(1-3): 15-29.
- [ 12 ] KOVACH J, PETZOLDT C, DEGNI J, et al. A method to measure the environmental impact of pesticides[J]. *New York's Food Life Sci*

- Bull, 1992(139): 1-8.
- [13] LEVITAN L. "How to" and "why": assessing the enviro-social impacts of pesticides[J]. *Crop Prot*, 2000, 19(8-10): 629-636.
- [14] 张志恒, 胡秀卿, 汪雯, 等. 农药对健康及环境影响药迹模型的构建与应用[J]. *农药学报*, 2018, 20(6): 765-775.  
ZHANG Z H, HU X Q, WANG W, et al. Construction and application of pesticide trace model on human health and environmental impacts[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2018, 20(6): 765-775.
- [15] VRYZAS Z. Pesticide fate in soil-sediment-water environment in relation to contamination preventing actions[J]. *Curr Opin Environ Sci Heal*, 2018, 4: 5-9.
- [16] DELCOUR I, SPANOGHE P, UYTENDAELE M. Literature review: impact of climate change on pesticide use[J]. *Food Res Int*, 2015, 68: 7-15.
- [17] KUMAR S, KAUSHIK G, DAR M A, et al. Microbial degradation of organophosphate pesticides: a review[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(2): 190-208.
- [18] EEVERS N, WHITE J C, VANGRONVELD J, et al. Bio- and phytoremediation of pesticide-contaminated environments: a review[J]. *Adv Bot Res*, 2017, 83: 277-318.
- [19] RANI S, SUD D. Role of enhanced solar radiation for degradation of triazophos pesticide in soil matrix[J]. *Sol Energy*, 2015, 120: 494-504.
- [20] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241.  
WU K N, ZHAO R. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 227-241.
- [21] 黄宝勇, 肖志勇, 欧阳喜辉. 贮存温度条件对蔬菜基质中农药残留稳定性的影响[J]. *农产品质量与安全*, 2013(2): 48-51.  
HUANG B Y, XIAO Z Y, OUYANG X H. Effects of storage temperature on the stability of pesticide residues in vegetable substrate[J]. *Qual Saf Agro-Prod*, 2013(2): 48-51.
- [22] 中国气象局, 国家气候委员会. 中国气候公报(2018年)[DB/OL]. (2019-03-18)[2019-07-11]. [http://www.cma.gov.cn/root7/auto13139/201903/t20190319\\_517664.html](http://www.cma.gov.cn/root7/auto13139/201903/t20190319_517664.html).  
China Meteorological Administration, National Climate Committee. China climate bulletin (2018)[DB/OL]. (2019-03-18)[2019-07-11]. [http://www.cma.gov.cn/root7/auto13139/201903/t20190319\\_517664.html](http://www.cma.gov.cn/root7/auto13139/201903/t20190319_517664.html).
- [23] 丁一汇. 中国气候 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 373.  
DING Y H. China climate[M]. Beijing: Science Press, 2017: 373.
- [24] 陈雅敏, 冯述青, 杨天翔, 等. 我国不同类型土壤有机质含量的统计学特征[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2013, 52(2): 220-224.  
CHEN Y M, FENG S Q, YANG T X, et al. Statistical characteristics of organic matter content from different soil classes in China[J]. *J Fudan Univ (Nat Sci Ed)*, 2013, 52(2): 220-224.
- [25] 穆海振, 史军, 杨涵海, 等. 崇明生态岛气候变化及影响评估研究 [J]. *气象科技进展*, 2017, 7(6): 143-149.  
MU H Z, SHI J, YANG H W, et al. Climate change and impact assessment for Chongming island in 1961-2016[J]. *Adv Meteorol Sci Technol*, 2017, 7(6): 143-149.
- [26] 林群星. 1960—2012年铜陵地区气候特征及变化分析[J]. *现代农业科技*, 2016(9): 238-240.  
LIN Q X. Analysis on climatic characteristics and changes of Tongling area during 1960 to 2012[J]. *Mod Agric Sci Tech*, 2016(9): 238-240.
- [27] 冯俊妮, 彭杰彪, 刘钟中. 1961—2016年益阳市农业气候资源的变化特征[J]. *广东气象*, 2018, 40(4): 39-42.  
FENG J N, PENG J B, LIU Z Z. Changes of agricultural climate resources in Yiyang City from 1961 to 2016[J]. *Guangdong Meteorol*, 2018, 40(4): 39-42.
- [28] FAO. Harmonized World soil database v 1.2[DB/OL]. [2019-07-11]. [http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/?tidsourcetags\\_pcqq\\_aiomsg](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/?tidsourcetags_pcqq_aiomsg).
- [29] 黑龙江省农垦总局统计局. 黑龙江垦区统计年鉴(2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.  
Statistics Bureau of Heilongjiang Farms & Land Reclamation Administration. Statistical yearbook of Heilongjiang state farms (2018)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [30] 程学刚. 黑龙江垦区土壤养分状况分析及评价[J]. *现代化农业*, 1990(8): 9-10.  
CHENG X G. Analysis and evaluation of soil nutrient status in Heilongjiang reclamation area[J]. *Mod Agric*, 1990(8): 9-10.
- [31] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴(2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.  
Statistics Bureau of Zhejiang Province, Zhejiang Survey Team of National Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook (2018)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [32] 麻万诸. 浙江省耕地肥力现状及对策[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011: 25-27.  
MA W Z. Status and management measures of soil fertilities of cultivated land in Zhejiang Province, China[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2011: 25-27..
- [33] 浙江省统计局. 浙江自然资源与环境统计年鉴(2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.  
Statistics Bureau of Zhejiang Province. Zhejiang statistical yearbook of natural resources and environment (2018)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018..
- [34] 农业部. 到2020年农药使用量零增长行动方案[DB/OL]. (2015-03-18)[2019-08-04]. [http://jiuban.moa.gov.cn/zwlml/tzgg/tz/201503/t20150318\\_4444765.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/zwlml/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm).  
Ministry of Agriculture. Action plan for zero growth in pesticide use by 2020[DB/OL]. (2015-03-18)[2018-05-24]. [http://jiuban.moa.gov.cn/zwlml/tzgg/tz/201503/t20150318\\_4444765.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/zwlml/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm).
- [35] 徐长春. "十三五"国家重点研发计划农药减施增效类项目述评[J]. *植物保护*, 2018, 44(5): 91-94.  
XU C C. Introduction to and comments on the research projects of reduced application and increased efficacy of pesticides supported by National Key R&D Program of China during the 13th Five-Year Period[J]. *Plant Prot*, 2018, 44(5): 91-94.
- [36] 王腾飞. 掌握农药使用大数据 农业农村部将大力推进全国农户用药调查[J]. *农药市场信息*, 2019(7): 14.  
WANG T F. Master big data of pesticide use: Ministry of Agriculture and Rural Affairs will promote vigorously the nationwide survey of rural household pesticides use[J]. *Pestic Mark News*, 2019(7): 14.
- [37] 时若飞. 农药双向全链条可追溯管理工作现状分析[J]. *河南农业*, 2019(5): 22.  
SHI R F. Analysis of current situation of bidirectional full chain traceability management of pesticides[J]. *Henan agric*, 2019(5): 22.