

高效氟吡甲禾灵对潮土微生物呼吸及酶活性的影响

程亚南, 王振东, 任秀娟, 郭彦玲, 刘根源

引用本文:

程亚南, 王振东, 任秀娟, 等. 高效氟吡甲禾灵对潮土微生物呼吸及酶活性的影响[J]. [农业环境科学学报](#), 2021, 40(5): 1026-1033.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1096>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[吡啶醚菌酯对土壤微生物呼吸作用及土壤酶活性的影响](#)

袁传卫, 姜兴印, 殷万元, 芦勇, 李向东, 张吉旺

[农业环境科学学报](#). 2015, 34(5): 897-903 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.012>

[土壤微生物对邻苯二甲酸二\(2-乙基己\)酯胁迫的生态响应](#)

夏庆兵, 王军, 朱鲁生, 王金花, 刘文军

[农业环境科学学报](#). 2016, 35(7): 1344-1350 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.017>

[赤子爱胜蚓对乙草胺污染土壤微生物群落的影响](#)

郝月崎, 孙扬, 李晓晶, 周斌, 翁莉萍, 李永涛, 赵丽霞

[农业环境科学学报](#). 2018, 37(11): 2456-2466 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0504>

[纳米银对四种不同性质土壤微生物量及酶活性的影响](#)

舒昆慧, 张丽, 伍玲丽, 司友斌, 刘沁雪

[农业环境科学学报](#). 2018, 37(5): 907-914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1325>

[覆膜玉米不同生育期土壤酶活性对大气CO₂浓度升高的响应](#)

周娅, 冯倩, 王玉, 张晓媛, 王丽梅, 李世清

[农业环境科学学报](#). 2019, 38(5): 1185-1192 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1149>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程亚南, 王振东, 任秀娟, 等. 高效氟吡甲禾灵对潮土微生物呼吸及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1026–1033.
CHENG Ya-nan, WANG Zhen-dong, REN Xiu-juan, et al. Impact of haloxyfop-R-methyl on microbial respiration and enzyme activities in fluvio-aquic soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 1026–1033.



开放科学 OSID

高效氟吡甲禾灵对潮土微生物呼吸及酶活性的影响

程亚南, 王振东, 任秀娟, 郭彦玲, 刘根源

(河南科技学院资源与环境学院, 河南 新乡 453000)

摘要:为了探究除草剂——高效氟吡甲禾灵对土壤生态系统的毒理效应,采用室内培养法,设置对照(CK)、0.01 mg·kg⁻¹(T1)、0.04 mg·kg⁻¹(T2)、0.08 mg·kg⁻¹(T3)、0.16 mg·kg⁻¹(T4)、0.40 mg·kg⁻¹(T5)6个处理,研究不同浓度高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸强度和酶活性的影响。结果表明:除T1处理显著促进土壤呼吸外,在培养第7 d和14 d时T2和T3处理显著抑制了土壤呼吸;T4处理在第7 d时抑制土壤呼吸,之后转为激活;T5处理在培养前14 d与CK基本持平。高效氟吡甲禾灵显著抑制了土壤蔗糖酶的活性,且抑制程度与浓度呈正比,在培养35 d时T1处理的土壤蔗糖酶活性已恢复至CK水平,而高浓度处理下的抑制作用则较强。而对于土壤脲酶,高效氟吡甲禾灵反而显著刺激了其活性,除在培养7、21 d和28 d时,T5处理的脲酶活性与CK持平外,随着高效氟吡甲禾灵浓度的增加,土壤脲酶活性逐渐增强。在培养14 d时高效氟吡甲禾灵显著抑制了土壤过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性,在培养7 d时浓度达到T3才开始抑制这两种酶的活性,而在培养21 d时浓度达到T4才开始抑制过氧化氢酶的活性,碱性磷酸酶活性则在浓度达到T3时又恢复到CK水平。研究表明,高浓度高效氟吡甲禾灵条件下,蔗糖酶和脲酶活性被显著抑制和激活,能够表征高效氟吡甲禾灵的污染程度,而过氧化氢酶和碱性磷酸酶在培养21 d时基本恢复到对照水平,表现出较强的耐受性。

关键词:高效氟吡甲禾灵;土壤微生物呼吸;蔗糖酶;脲酶;过氧化氢酶;碱性磷酸酶

中图分类号:X172;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)05-1026-08 doi:10.11654/jaes.2020-1096

Impact of haloxyfop-R-methyl on microbial respiration and enzyme activities in fluvio-aquic soil

CHENG Ya-nan, WANG Zhen-dong, REN Xiu-juan, GUO Yan-ling, LIU Gen-yuan

(School of Resources and Environment, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453000, China)

Abstract: To evaluate the toxicological effects of haloxyfop-R-methyl on soil microbial ecosystem, a laboratory incubation experiment was conducted to investigate the responses of soil microbial respiration and enzymatic activities to haloxyfop-R-methyl. Six treatments were included: (1) control(CK); (2) 0.01 mg·kg⁻¹(T1); (3) 0.04 mg·kg⁻¹(T2); (4) 0.08 mg·kg⁻¹(T3); (5) 0.16 mg·kg⁻¹(T4); and (6) 0.40 mg·kg⁻¹(T5). Results showed that soil microbial respiration was significantly enhanced by T1 treatment during the experimental process. However, T2 and T3 treatments significantly inhibited soil microbial respiration on the 7th and 14th day of culture. Soil microbial respiration in T4 treatment was first inhibited on the 7th day, and then activated, while soil microbial respiration in T5 treatment was basically consistent with that in the control within the first 14 days of incubation. Sucrase activity was significantly inhibited by haloxyfop-R-methyl and significantly and negatively correlated with the concentration of haloxyfop-R-methyl. Sucrase activity in T1 treatment returned to that in the control level on the 35th day; however, the inhibition effect was stronger under the condition of higher haloxyfop-R-methyl concentration. Soil urease activity was significantly activated by haloxyfop-R-methyl. Soil urease activity was gradually enhanced by increasing the concentration of haloxyfop-R-methyl except in T5 treatment, which soil urease activity was similar to that in the control group on the 7th, 21st, and 28th day. The activities of soil catalase and alkaline phosphatase were significantly inhibited on the 14th day of incubation; however, the activities of the two enzymes were initially inhibited at T3 concentration of haloxyfop-R-methyl on the 7th day.

收稿日期:2020-09-20 录用日期:2021-01-11

作者简介:程亚南(1984—),女,河南洛阳人,博士,讲师,主要从事土壤生态环境研究。E-mail: yncheng@hist.edu.cn

基金项目:河南科技学院高层次人才项目(208010613001);河南省大学生创新创业训练计划项目(S202010467020)

Project supported: The Project of High-level Talent Introduction of Henan Institute of Science and Technology (208010613001); College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program of Henan Province(S202010467020)

Catalase activity was inhibited only when the concentration of haloxyfop-R-methyl reached that of T4, and alkaline phosphatase activity returned to that in the control level when the concentration reached that of T3 on the 21st day. Therefore, sucrase and urease activities were significantly inhibited and activated, respectively under the condition of high haloxyfop-R-methyl concentration, characterizing the pollution degree of haloxyfop-R-methyl. Moreover, the activities of soil catalase and alkaline phosphatase basically recovered to that of the control level on the 21st day, showing strong tolerance to the presence of haloxyfop-R-methyl.

Keywords: haloxyfop-R-methyl; soil microbial respiration; sucrase; urease; catalase; alkaline phosphatase

高效氟吡甲禾灵是一种选择性除草剂,用于各种阔叶作物田中防除各种禾本科杂草。20世纪70年代末,高效氟吡甲禾灵开始在中国油菜田广泛使用^[1]。高效氟吡甲禾灵喷洒后,迅速被吸收至禾本科杂草的叶片,并快速转移至植株的各个部位,抑制植物分生组织的生长,从而达到灭杀禾本科杂草的目的^[2]。它的药效稳定,受外界环境和土壤条件的影响较小,能够很好地防除大多数一年生和多年生的禾本科杂草。高效氟吡甲禾灵为芳氧基苯氧基丙酸类除草剂,近年来随着此类除草剂长期单一、不合理、不科学地使用,其经常作为污染物在环境中被检测到^[3]。

土壤呼吸是土壤全部代谢过程的总和,被认为是土壤微生物总活性的指标,也是土壤污染评价的常用指标之一^[4]。Reis等^[5]研究表明,敌草隆、环嗪酮和甲噻磺隆混合施用可提高沙土的呼吸强度。Nguyen等^[6]利用Meta分析发现,当作用时间小于60 d时,草甘膦对土壤呼吸有短暂的促进作用。土壤酶是土壤的重要组成部分,是土壤养分循环、有机质形成、能量代谢等过程的生物催化剂。土壤酶活性对于自然或人为干扰引起的变化具有很高的敏感性和相对快速的反应,是表征土壤农药污染的有力指标^[7-9]。除草剂的使用会改变土壤酶活性和微生物群落的结构和多样性,从而破坏土壤生态系统的平衡^[10]。Baćmaga等^[11]研究了吡氟草胺、甲磺隆和甲基磺隆钠盐混施对土壤酶活性的影响,结果表明,在推荐用量下,除草剂激活了土壤过氧化氢酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性;高施用量(36.48 mg·kg⁻¹)条件下,则显著抑制了酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性。侯文军等^[12]研究了草甘膦对桉树人工林土壤酶活性的影响,发现施用草甘膦显著抑制了0~5 cm土层的过氧化氢酶和酸性磷酸酶的活性;而土壤脲酶活性和蔗糖酶活性均较对照组有所提高,但差异不显著。

目前,国内外关于高效氟吡甲禾灵的研究主要集中在药效、残留分析方法、抗性机制及合成方法等方面,而其残留对土壤生态系统毒理效应的研究则未见报道。因此,本研究采用室内培养法,向土壤中添加

不同浓度的高效氟吡甲禾灵,研究其对土壤呼吸及土壤酶活性的影响,旨在评价其环境生态效应,以便为更经济合理地使用该除草剂,减少环境污染等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试药品

本研究所用除草剂为108 g·L⁻¹的高效氟吡甲禾灵乳油,由江苏中旗作物保护股份有限公司生产。

1.2 供试土壤

供试土壤取自河南科技学院东区未进行过任何农事操作和施药的0~20 cm表层土,土壤类型为潮土,土样采集后过2 mm筛。供试土壤pH为7.69(土水比为1:2.5),有机质11.52 g·kg⁻¹,碱解氮96.60 mg·kg⁻¹,速效磷3.45 mg·kg⁻¹,速效钾145.45 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计

称取供试土壤200 g,按照推荐的田间施用量设置6个浓度处理,分别为0、0.01、0.04、0.08、0.16 mg·kg⁻¹和0.40 mg·kg⁻¹,分别用CK、T1、T2、T3、T4和T5表示,每个处理设置3个重复。土壤样品在恒温25℃下避光培养,培养期间保持土壤含水量为田间持水量的60%,分别在培养的第7、14、21、28、35 d测定土壤呼吸强度和土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性。

1.4 测定方法

土壤呼吸强度采用室内密闭培养、碱液吸收法^[13]进行测定,以24 h后1 kg土壤中二氧化碳的mg数表示。土壤蔗糖酶活性测定采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[14],以24 h后1 g土壤中葡萄糖的mg数表示。脲酶活性测定采用靛酚蓝比色法^[14],以24 h后1 g土壤中NH₄⁺-N的mg数表示。过氧化氢酶活性测定采用高锰酸钾滴定法^[14],以20 min后1 g土壤分解的过氧化氢的mg数表示。碱性磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法^[14],以24 h后1 g土壤中P₂O₅的mg数表示。

1.5 数据处理

不同处理对土壤呼吸和酶活性抑制率的计算公

式为:

$$\text{抑制率}=(1-A/B)\times 100\%$$

式中: A 为添加高效氟吡甲禾灵时的土壤呼吸强度或酶活性; B 为CK处理的土壤呼吸强度或酶活性。抑制率为正值表示抑制作用,负值表示激活作用。

测定数据采用 Microsoft Excel 2016 作图,利用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), Duncan 法进行 CK 组及处理组间的多重比较。

2 结果与分析

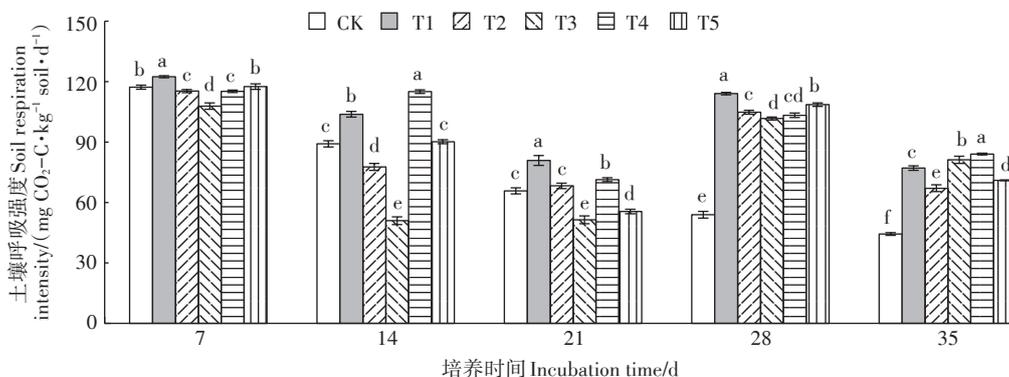
2.1 高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸强度的影响

添加高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸影响的变化趋势如图 1 所示。CK 组土壤呼吸呈持续下降的趋势,高效氟吡甲禾灵胁迫下,土壤呼吸强度则呈现先下降再上升最后又下降的变化趋势(图 1)。培养前 21 d,土壤呼吸强度持续下降,T1 处理(除第 14 d)的土壤呼吸强度显著高于 CK 和其他处理。在培养第 28 d 时,添加高效氟吡甲禾灵显著提高了土壤呼吸强度,与 CK 相比,提高了 88.58%~111.50%。在培养第 35 d 时,土壤呼吸强度较第 28 d 明显下降,与 CK 相比,添加不同剂量的高效氟吡甲禾灵均显著促进了土壤呼吸强度($P<0.05$)。T1 处理在整个试验周期内的土壤呼吸均显著高于 CK,说明低浓度的高效氟吡甲禾灵可提高土壤的呼吸强度,对土壤微生物新陈代谢有一定的促进作用。T2 处理对土壤呼吸的影响表现为“抑制-激活”的变化趋势,相比于 CK 处理,其在培养前期(第 7 d 和 14 d)抑制土壤呼吸,中后期(第 21、28 d 和 35 d)则转为激活作用。T3 处理在试验前 21 d,土壤呼吸强度显著低于 CK,表现为抑制作用,抑制率最高为 42.81%(第 14 d),在试验后期(第 28 d 和 35 d)

则表现为激活作用。与 CK 相比,T4 处理在培养前期(第 7 d)对土壤呼吸表现为抑制作用,随着培养时间延长,则表现为促进作用,说明添加 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸有一个短暂的胁迫过程。T5 处理对土壤呼吸的影响表现为“弱激活-抑制-激活”的变化趋势,在试验前 14 d,虽然土壤呼吸强度高于 CK 处理,但未到达显著水平($P>0.05$);培养 21 d 时,则显著低于 CK 处理;在培养后期(28 d 和 35 d),高浓度的高效氟吡甲禾灵则显著促进了土壤微生物的呼吸作用。综上所述,与 CK 相比,在培养的中前期(前 21 d),不同添加量的高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸的影响相对较小,在后期则表现为显著的促进作用($P<0.05$)。土壤呼吸与高效氟吡甲禾灵浓度的相关系数为 $-0.323\sim 0.536$ ($P>0.05$),表明在同一培养时间下,土壤呼吸与高效氟吡甲禾灵之间没有显著的剂量-效应关系。

2.2 高效氟吡甲禾灵对土壤蔗糖酶活性的影响

不同浓度高效氟吡甲禾灵对土壤蔗糖酶活性的动态影响见图 2。由图 2 可知,土壤蔗糖酶活性整体呈现先升高后降低的变化趋势,其中第 28 d 时活性最高。与 CK 相比,在整个培养周期内,不同浓度的高效氟吡甲禾灵均显著抑制了蔗糖酶的活性($P<0.05$),且浓度越高,抑制作用越大,抑制作用持续到试验结束。在培养第 7 d,T2 处理对蔗糖酶活性的抑制作用最小,抑制率为 21.79%,中高浓度(T3、T4 和 T5)处理对蔗糖酶活性的抑制作用较强,平均抑制率为 41.96%。培养 14 d 时,与 CK 相比,添加不同浓度的高效氟吡甲禾灵仍显著抑制蔗糖酶活性,T1、T2、T3 和 T5 处理间的差异不显著。试验第 21 d 时,各处理的蔗糖酶活性均显著低于 CK,中低浓度(T1、T2 和 T3)处理间无显



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图 1 高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸作用的影响

Figure 1 Effects of haloxyfop-R-methyl on soil respiration

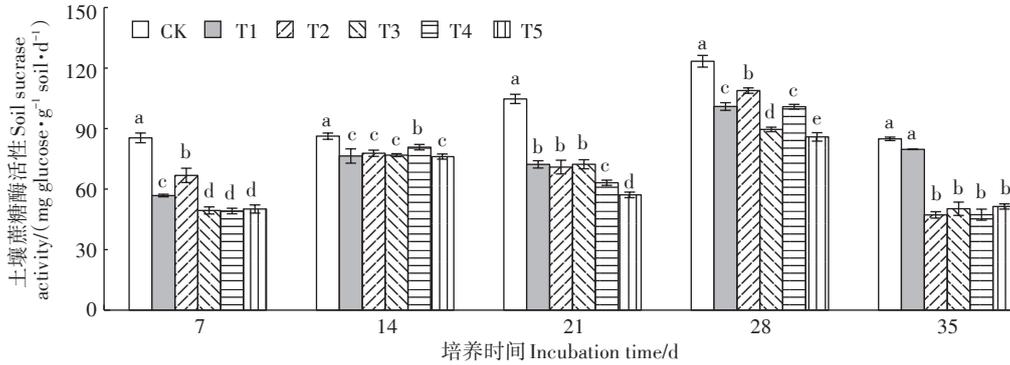


图2 高效氟吡甲禾灵对土壤蔗糖酶活性的影响

Figure 2 Effects of haloxyfop-R-methyl on soil sucrase activity

著差异 ($P>0.05$), 但显著高于高浓度 (T4 和 T5) 处理的蔗糖酶活性, 其中 T5 处理对土壤蔗糖酶活性的抑制率最高, 为 45.43%。培养第 28 d 时, 土壤蔗糖酶活性呈现上升趋势, 但仍显著低于 CK 处理, 其中 T5 的抑制作用仍显著高于其他处理。至培养第 35 d 时, T1 处理的土壤蔗糖酶活性已恢复至 CK 水平, 而其他处理仍显著低于 CK, 但处理间的差异不显著。说明随着培养时间的延长, 添加低浓度高效氟吡甲禾灵对土壤蔗糖酶活性的影响逐渐减弱甚至消失, 但是高浓度高效氟吡甲禾灵对土壤蔗糖酶活性的抑制作用较强, 且恢复较慢。蔗糖酶活性与高效氟吡甲禾灵浓度的相关性分析结果表明, 除培养第 14 d 外, 二者之间的相关系数为 $-0.866 \sim -0.617$ ($P<0.01$), 表明在一定浓度范围内, 高效氟吡甲禾灵浓度越高对土壤蔗糖酶活性的抑制作用越强。

2.3 高效氟吡甲禾灵对土壤脲酶活性的影响

如图 3 所示, 随着培养时间的延长, 土壤脲酶活性呈现先增加后降低的变化趋势, 在第 14 d 时脲酶活性达到峰值, 之后活性下降并保持相对稳定。与 CK 相比, 添加高效氟吡甲禾灵对脲酶活性有显著的激活

作用。培养前 28 d, T1、T2、T3 和 T4 处理均显著激活土壤脲酶活性, 而 T5 处理 (除第 14 d) 则与 CK 无显著差异。但随着培养时间延长, 不同浓度高效氟吡甲禾灵处理间的差异逐渐缩小, 即浓度效应逐渐减弱甚至消失。在添加高效氟吡甲禾灵的第 7 d, 除 T5 外, 其他处理的脲酶活性均显著高于 CK 处理。在试验第 14 d, 各处理的脲酶活性均显著高于 CK 组, 其中, T3 和 T5 处理的脲酶激活率较高, 分别为 28.67% 和 28.38%。培养第 21 d 和 28 d 时, T5 处理的脲酶活性与 CK 组差异不显著 ($P>0.05$), 其他浓度处理则显著促进脲酶活性。培养 35 d 时, T1 处理的激活作用减弱, 与 CK 间差异不显著 ($P>0.05$), 说明随着培养时间的延长, 低浓度高效氟吡甲禾灵对土壤脲酶活性的影响逐渐减弱, 表现为微弱的激活作用; 而其他浓度处理与 CK 组的差异显著 ($P<0.05$), 说明中高浓度高效氟吡甲禾灵对脲酶活性的影响较为显著。

2.4 高效氟吡甲禾灵对土壤过氧化氢酶活性的影响

不同浓度高效氟吡甲禾灵对土壤过氧化氢酶活性的影响见图 4。整体来看, 过氧化氢酶活性呈现先降低后升高的趋势, 在试验第 28 d, 过氧化氢酶活性

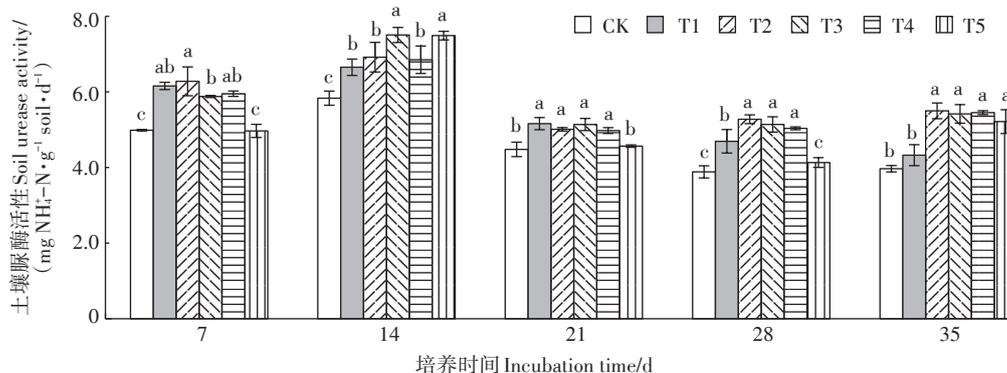


图3 高效氟吡甲禾灵对土壤脲酶活性的影响

Figure 3 Effects of haloxyfop-R-methyl on soil urease activity

降至最低,第35 d时有小幅回升。培养7 d时,低浓度高效氟吡甲禾灵(T1和T2)的过氧化氢酶活性与CK的差异不显著($P>0.05$),中高浓度高效氟吡甲禾灵(T3、T4和T5)处理的过氧化氢酶活性则显著低于CK。第14 d时,与CK相比,高效氟吡甲禾灵显著抑制了过氧化氢酶的活性,其中T2处理的抑制率最高,为13.75%。培养21 d时,中低浓度高效氟吡甲禾灵(T1、T2和T3)的抑制作用减弱,与CK组的差异不显著($P>0.05$),而高浓度处理(T4和T5)仍显著抑制过氧化氢酶活性。培养28 d时,除T4处理显著激活土壤过氧化氢酶活性外,其他处理与CK组均无显著差异。第35 d时,各处理的过氧化氢酶活性均低于CK,但差异不显著(T4除外),这可能是由于随着培养时间的延长,高效氟吡甲禾灵逐渐降解,对土壤微生物和酶活性的影响逐渐减弱,因此土壤过氧化氢酶的活性恢复至CK水平。上述结果表明,土壤过氧化氢酶对高效氟吡甲禾灵的影响周期为4~5周,试验结束时,各处理的过氧化氢酶活性基本恢复到

CK水平。土壤过氧化氢酶活性与高效氟吡甲禾灵浓度间没有显著的相关性(相关系数为 -0.114 , $P>0.05$),但是与培养时间之间的相关性达到极显著水平(相关系数为 $-0.914\sim-0.801$, $P<0.01$),说明过氧化氢酶活性主要取决于培养时间,而除草剂剂量的影响不显著。

2.5 高效氟吡甲禾灵对土壤碱性磷酸酶活性的影响

由图5可以看出,高效氟吡甲禾灵对土壤碱性磷酸酶活性的影响有一定的波动性,呈现“抑制-激活-与对照持平”的变化趋势。添加高效氟吡甲禾灵的第7 d,低浓度(T1和T2)处理对碱性磷酸酶没有显著的影响,与CK处理的差异不显著($P>0.05$);中高浓度处理(T3、T4和T5)则显著抑制了碱性磷酸酶的活性,其中T5的抑制率最大,为7.40%。说明土壤碱性磷酸酶对高浓度高效氟吡甲禾灵较为敏感且反应迅速。培养第14 d,与CK相比,添加高效氟吡甲禾灵显著抑制了碱性磷酸酶活性,抑制率为0.28%~11.95%。培养第21 d,各处理的碱性磷酸酶活性仍低于CK,且低浓度处理的抑制率高于高浓度。培养第28 d时,高效氟吡

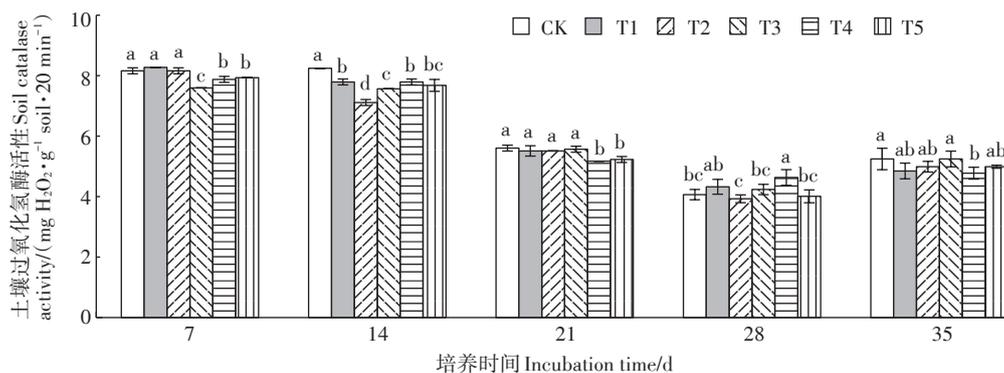


图4 高效氟吡甲禾灵对土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 4 Effects of haloxyfop-R-methyl on soil catalase activity

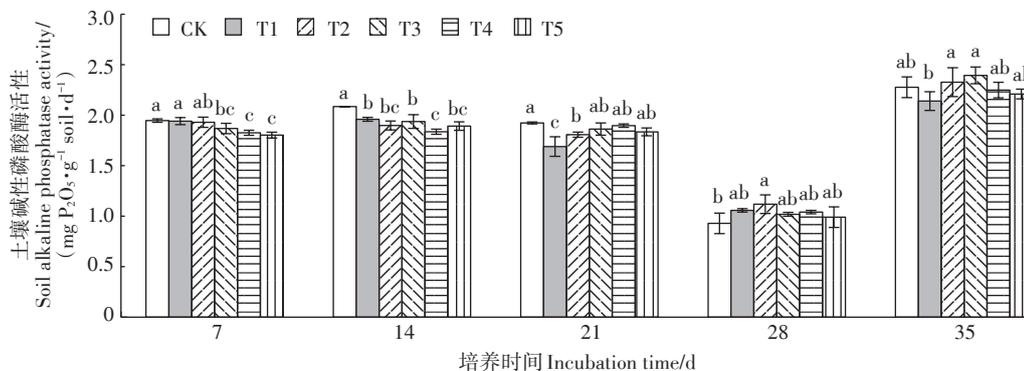


图5 高效氟吡甲禾灵对土壤碱性磷酸酶活性的影响

Figure 5 Effects of haloxyfop-R-methyl on soil alkaline phosphatase activity

甲禾灵对土壤碱性磷酸酶活性呈现微弱的激活效果, T1、T3、T4和T5处理组与CK组的差异不显著。至培养35 d时,各处理与CK基本持平。综上认为,高效氟吡甲禾灵对土壤碱性磷酸酶活性的影响,随着浓度和培养时间的变化而变化,浓度和抑制率间没有明显的规律性。整体来看,在试验浓度范围内,高效氟吡甲禾灵对碱性磷酸酶活性主要表现为抑制作用,但在培养的中后期(21、28 d和35 d),与CK组的差异多为不显著,说明碱性磷酸酶活性对高效氟吡甲禾灵反应不敏感。

3 讨论

土壤呼吸作用的强弱能够反映出土壤微生物的总活性,是判断土壤系统新陈代谢能力的一个重要环节。在整个试验周期内,CK组的土壤呼吸强度持续下降,这是由于随着培养时间的延长,土壤可利用碳数量下降,使土壤呼吸逐渐减弱。本试验发现,高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸有双重影响,既有促进又有抑制,但整体上呈促进作用。Cycoń等^[15]研究发现,施用 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $150.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 敌草隆能够促进土壤呼吸。这可能是由于除草剂施入土壤后,土壤中耐受性微生物数量增加,这些微生物能够将有机农药作为能源进行繁殖,从而增加土壤微生物活动^[8]。在培养前21 d,中高浓度的高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸有抑制作用。郑彬等^[16]的研究发现,初始时向土壤中加入较高浓度的B[a]P,土壤呼吸呈现先减弱,后逐渐恢复的规律,与本研究的结果基本一致。这可能是因为前期较高浓度的高效氟吡甲禾灵抑制了微生物的活性与生长,从而抑制了土壤微生物呼吸;在培养后期,部分微生物对高效氟吡甲禾灵产生了一定的耐受性或其在土壤中水解而被微生物利用,从而使微生物活性增加。Reis等^[15]的研究则表明,在培养7、14 d和28 d时,施用敌草隆、环嗪酮和甲噁磺隆对土壤呼吸没有显著影响。这可能是由于不同除草剂的分子式、化学键等相差较大,对不同土壤微生物的影响也不同,导致试验结果不一致。整体来看,土壤呼吸对高效氟吡甲禾灵反应敏感,高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸的影响较为持久,在试验结束时仍未恢复至CK水平,初步判断高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸的作用时间在35 d以上。

蔗糖酶可水解蔗糖,反映了土壤有机碳的转化能力,土壤蔗糖酶活性是评价土壤熟化程度和土壤肥力的指标。本研究结果表明,土壤蔗糖酶活性与高效氟吡甲禾灵浓度成反比。吴小玲等^[17]研究发现,草甘膦

对稻田土壤蔗糖酶活性有较强的抑制作用,这与本研究结果一致。这可能是由于高效氟吡甲禾灵抑制了土壤中利用葡萄糖的微生物活性,从而抑制了其酶促反应。侯文军等^[12]的研究则表明,施用草甘膦对土壤蔗糖酶活性无显著影响,这可能是由于采样时间是在施用草甘膦的半年后,除草剂被分解而导致对土壤酶活性的影响减弱甚至消除。谢勇波^[18]研究了高效氟吡甲禾灵对植烟土壤中蔗糖酶活性的影响,结果表明,随着培养时间的延长,高效氟吡甲禾灵对土壤蔗糖酶活性的影响表现为“抑制-激活-再抑制”的变化规律,这与本研究结果不一致。主要是由于本研究的供试土壤呈碱性,种植烟草土壤的pH一般为5.5~7.0,而pH会影响微生物及土壤酶对高效氟吡甲禾灵的降解。另外,土壤蔗糖酶活性被激活或被抑制随农药种类、施药量、土壤性质等的不同也有明显的差异。

脲酶是氮素循环的关键性酶,是唯一能促进尿素分子中酰胺键水解的酶,与土壤供氮能力有密切关系。Xiong等^[19]研究了丁吡吗啉对旱地土壤酶活性的影响,发现施用量在 $5 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,丁吡吗啉对土壤脲酶产生激活作用,这与本试验的结果一致。高效氟吡甲禾灵对脲酶的激活作用可能是由于其在土壤中的降解产物是土壤中某些微生物的生长因子^[20-21],从而提高微生物活性;而生物降解是农药等化学药品从土壤中散失的最重要机制^[22],因此土壤中的微生物可能通过降解高效氟吡甲禾灵,从而降低其毒性。但是,脲酶活性过高对土壤肥力和作物生长可能是有害的,因为脲酶能够催化土壤中的尿素迅速水解,产生硝酸盐和氨毒害。因此,高浓度的高效氟吡甲禾灵虽然促进了脲酶活性,但也可能对土壤氮素代谢及土壤肥力产生一定的不利影响。Tomkiel等^[23]在研究氟噻草胺和异恶唑草酮对土壤酶活性影响时发现,除草剂对脲酶活性产生抑制作用,但在推荐用量下,脲酶活性在试验第60 d比对照提高了31%。吴小虎等^[24]比较了5种除草剂对土壤脲酶活性的影响,发现不同浓度及不同培养时间对脲酶活性的影响不同, 0.05 、 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的甲咪唑烟酸、噻吩磺隆和 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 扑草净在培养的3~40 d内,对土壤脲酶活性均表现为“抑制-激活-抑制”的变化规律, $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 扑草净及 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 乳氟禾草灵处理也呈现同样的变化趋势,但在试验的第40 d时,脲酶活性恢复到对照水平。上述研究结果与本研究结果存在一定差异,这主要是受除草剂种类、土壤有机质、黏粒含量等因素的影响,使得不同除草剂对

同一种酶的影响不同。

土壤过氧化氢酶能有效防止土壤及生物体在新陈代谢过程中产生的过氧化氢的毒害,且与土壤好氧微生物的数量、土壤肥力有着密切的联系。施用高效氟吡甲禾灵后,土壤过氧化氢酶活性受到抑制。Kucharski等^[25]研究了主要成分为氟噻草胺和异恶唑草酮的新型除草剂对土壤过氧化氢酶活性的影响,结果表明施用除草剂后,过氧化氢酶活性与对照相比降低11.11%。严岩等^[26]的研究结果表明,不同浓度丁草胺处理的土壤过氧化氢酶活性均低于对照处理。兰景宇^[27]研究了不同浓度除草剂金都尔对荞麦田土壤过氧化氢酶活性的影响,结果表明,金都尔在培养的前40 d,对土壤过氧化氢酶活性有抑制作用。这可能是由于除草剂本身对土壤过氧化氢酶活性有抑制作用,或者是由于除草剂在降解过程中形成的中间产物的影响。Guo等^[28]的研究则发现,在培养的前21 d,啞菌酯对黑土过氧化氢酶活性基本无影响,但是在28 d时却显著促进了过氧化氢酶的活性。Cai等^[29]研究发现,低浓度丙酯草醚处理对过氧化氢酶活性影响不明显,高浓度处理则表现出激活作用。土壤酶活性的变化是各种因子协同作用的结果,受土壤类型、土壤理化性质、土壤微生物数量等因素的影响,导致土壤酶对除草剂的反应不同。

土壤磷酸酶能促进土壤有机磷化合物的矿化,磷酸酶活性的增加有利于土壤中磷素供应,因此,磷酸酶能够表征土壤磷素肥力状况。Baćmaga等^[11]研究发现,吡氟草胺、甲磺隆和甲基磺隆钠盐混施抑制了土壤碱性磷酸酶活性。Baćmaga等^[30]研究了螺环菌胺、戊唑醇和三唑醇混合物对土壤生物活性的影响,发现土壤碱性磷酸酶活性在培养25 d被激活,而50 d时活性受到抑制。陈妮等^[31]研究了除草剂精异丙甲草胺对烟田土壤酶活性的影响,发现在培养的第1~2周,精异丙甲草胺对土壤磷酸酶表现为抑制作用,且抑制程度与浓度成正比。这与本研究的结果基本一致,即高浓度高效氟吡甲禾灵对土壤碱性磷酸酶有一定的抑制作用,但是在第14 d时抑制作用基本消除,低浓度高效氟吡甲禾灵对碱性磷酸酶的影响较小。高浓度高效氟吡甲禾灵对碱性磷酸酶的抑制作用是由于过量除草剂加入使土壤条件发生变化,从而抑制碱性磷酸酶活性^[32]。Tomkiel等^[33]在研究土壤酶对唑草酮抗性时则发现,施用唑草酮刺激了土壤碱性磷酸酶活性,这与本研究的结果不一致,可能是由于不同除草剂对不同环境下土壤微生物种群的影响不同,以

及土壤中微生物群落不同所导致。

4 结论

(1) 高效氟吡甲禾灵对土壤呼吸强度呈激活作用。但是,与高效氟吡甲禾灵浓度相比,培养时间对土壤呼吸的影响更大,土壤呼吸强度与高效氟吡甲禾灵浓度之间没有明显的剂量-效应关系。

(2) 高效氟吡甲禾灵对不同土壤酶活性的影响随施用浓度和作用时间的不同而异。土壤蔗糖酶活性受到显著抑制($P < 0.05$),抑制强度与浓度成正比。高效氟吡甲禾灵对土壤脲酶有明显的促进作用,随着反应时间的延长,不同浓度高效氟吡甲禾灵对脲酶活性影响的差异逐渐缩小。土壤过氧化氢酶对高效氟吡甲禾灵较为敏感,但是其影响能很快恢复,影响周期为4~5周。土壤碱性磷酸酶对高效氟吡甲禾灵反应不敏感,虽然碱性磷酸酶活性受到抑制,但抑制作用不显著($P > 0.05$)。

(3) 高效氟吡甲禾灵过量施用及残留对土壤生态系统存在一定的风险。土壤酶对高效氟吡甲禾灵高度敏感,可以作为评价高效氟吡甲禾灵对土壤生态环境影响的指标。

参考文献:

- [1] 朱亮,翁华,魏有海. 春油菜田抗性生物型野燕麦对高效氟吡甲禾灵的抗性机制研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(7): 128-133. ZHU Liang, WENG Hua, WEI You-hai. Resistant biotype *Avena fatua* L. in spring rape field: Resistance mechanisms to haloxyfop-R-methyl[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2019, 35(7): 128-133.
- [2] 吕晓辉. 野燕麦、旱雀麦对高效氟吡甲禾灵的抗药性研究[D]. 西宁:青海大学, 2016. LÜ Xiao-hui. Studies on herbicide-resistance of *Avena fatua* L. and *Bromus tectorum* Linn populations to haloxyfop-R-methyl[D]. Xining: Qinghai University, 2016.
- [3] Zhou J, Liu K, Xin F X, et al. Recent insights into the microbial catabolism of aryloxyphenoxy-propionate herbicides: Microbial resources, metabolic pathways and catabolic enzymes[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2018, 34(8): 117.
- [4] Hollender J, Althoff K, Mundt M, et al. Assessing the microbial activity of soil samples, its nutrient limitation and toxic effects of contaminants using a simple respiration test[J]. *Chemosphere*, 2003, 53(3): 269-275.
- [5] Reis F C D, Tornisiello V L, Martins B A B, et al. Respiration induced by substrate and bacteria diversity after application of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl alone and in mixture[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2019, 54(7): 560-568.
- [6] Nguyen D B, Rose M T, Rose T J, et al. Impact of glyphosate on soil microbial biomass and respiration: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 92: 50-57.
- [7] Jacobsen C S, Hjelmso M H. Agricultural soils, pesticides and microbi-

- al diversity[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2014, 27: 15–20.
- [8] Imfeld G, Vuilleumier S. Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: A critical review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 49: 22–30.
- [9] Sukul P. Enzymatic activities and microbial biomass in soil as influence by metalaxyl residues[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 44: 231–237.
- [10] Ratcliff A W, Busse M D, Shestak K J. Changes in microbial community structure following herbicide (glyphosate) additions to forest soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34(2/3): 114–124.
- [11] Baćmaga M, Borowik A, Kucharski J, et al. Microbial and enzymatic activity of soil contaminated with a mixture of diflufenican + mesosulfuron-methyl+iodosulfuron-methyl-sodium[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 643–656.
- [12] 侯文军, 邹明, 李宝福, 等. 草甘膦对桉树人工林土壤酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 76–79. HOU Wen-jun, ZOU Ming, LI Bao-fu, et al. Effect of glyphosate on soil enzyme activities in eucalyptus plantations[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48(11): 76–79.
- [13] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 226–228. XU Guang-hui, ZHENG Hong-yuan. Handbook of soil microbial analysis methods[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1986: 226–228.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1987. GUAN Song-yin. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1987.
- [15] Cycoń M, Piotrowska-Seget Z. Changes in bacterial diversity and community structure following pesticides addition to soil estimated by cultivation technique[J]. *Ecotoxicology*, 2009, 18: 632–642.
- [16] 郑彬, 马静静, 葛高飞, 等. B[a]P 累积污染对土壤呼吸强度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 259–266. ZHENG Bin, MA Jing-jing, GE Gao-fei, et al. Influence of benzo(a) pyrene superimposed pollution on soil respiration intensity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 259–266.
- [17] 吴小玲, 付立林, 贺小兵, 等. 草甘膦对稻田土壤酶活力与土壤呼吸强度的影响[J]. 湖南农业科学, 2011(9): 86–88. WU Xiao-ling, FU Li-lin, HE Xiao-bing, et al. Influences of glyphosate on soil enzyme activity and soil respiratory intensity in paddy-field[J]. *Hunan Agriculture Sciences*, 2011(9): 86–88.
- [18] 谢勇波. 高效氟吡甲禾灵在烟田中的残留降解及其对烤烟产质量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011. XIE Yong-bo. Degradation and residual of haloxyfop-R-methyl in the tobacco field and its effects on the yield and quality of flue-cured tobacco[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2011.
- [19] Xiong D, Gao Z, Fu B, et al. Effect of pyrimorph on soil enzymatic activities and respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 56: 44–48.
- [20] Liu J, Xie J M, Chu Y F, et al. Combined effect of cypermethrin and copper on catalase activity in soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(5): 327–332.
- [21] Qian H F, Hu B L, Wang Z Y, et al. Effects of validamycin on some enzymatic activities in soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 125: 1–8.
- [22] Yao X H, Min H, Lü Z H, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: 120–126.
- [23] Tomkiel M, Baćmaga M, Borowik A, et al. Effect of a mixture of flufenacet and isoxaflutole on population numbers of soil-dwelling microorganisms, enzymatic activity of soil, and maize yield[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2019, 54(10): 832–842.
- [24] 吴小虎, 徐军, 董丰收, 等. 5种除草剂对土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响[J]. 农药学学报, 2015, 17(2): 179–184. WU Xiao-hu, XU Jun, DONG Feng-shou, et al. Effects of five herbicides on activities of soil invertase and urease[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2015, 17(2): 179–184.
- [25] Kucharski J, Tomkiel M, Baćmaga M, et al. Enzyme activity and microorganisms diversity in soil contaminated with the Boreal 58 WG herbicide[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2016, 51(7): 446–454.
- [26] 严岩, 文波龙, 徐惠凤. 丁草胺对湿地芦苇生长发育及土壤酶活性的影响[J]. 农药学学报, 2015, 17(6): 674–679. YAN Yan, WEN Bo-long, XU Hui-feng. Effects of butachlor on the reed growth and soil enzymatic activity in the wetland[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2015, 17(6): 674–679.
- [27] 兰景宇. 荞麦田除草剂筛选及除草剂金都尔对土壤质量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016. LAN Jing-yu. Screening of herbicides and effects of S-metolachlor on soil quality in buckwheat field[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2016.
- [28] Guo P P, Zhu L S, Wang J H, et al. Enzymatic activities and microbial biomass in black soil as affected by azoxystrobin[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1353–1361.
- [29] Cai Z Q, Li S S, Zhang W J, et al. Effects of the novel pyrimidinyloxybenzoic herbicide ZJ0273 on enzyme activities, microorganisms and its degradation in Chinese soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(6): 4425–4433.
- [30] Baćmaga M, Kucharski J, Wyszowska J. Microbiological and biochemical properties of soil polluted with a mixture of spiroxamine, tebuconazole, and triadimenol under the cultivation of *Triticum aestivum* L.[J]. *Environment Monitoring and Assessment*, 2019, 191(7): 1–12.
- [31] 陈媿, 龙友华, 刘阿丽, 等. 除草剂精异丙甲草胺对烟田土壤酶活性的影响[J]. 山地农业学报, 2017, 36(6): 9–13. CHEN Ti, LONG You-hua, LIU A-li, et al. Effect of S-melachlor on activity of soil enzymes in tobacco field[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2017, 36(6): 9–13.
- [32] Abbas Z, Akmal M, Khan K, et al. Impacts of long-term application of butrill super (bromoxynil) herbicide on microbial population, enzymes activity, nitrate nitrogen, Olsen-P and total organic carbon in soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(5): 627–644.
- [33] Tomkiel M, Baćmaga M, Wyszowska J, et al. The effect of carfentrazone-ethyl on soil microorganisms and soil enzymes activity[J]. *Archives of Environmental Protection*, 2015, 41(3): 3–10.