

草甘膦的土壤酶效应研究

呼 蕾¹, 和文祥^{2,3}, 王旭东², 郑粉莉^{2,3}

(1. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部 西北水土保持研究所, 杨凌 陕西 712100)

摘 要:为了探讨当今世界使用量最大的除草剂——草甘膦的土壤环境效应, 本文采用室内模拟方法, 较为系统地研究了我国 4 类土壤: 褐土、黄绵土、风沙土和红壤, 共 11 个土样中 4 种主要酶类(脲酶、转化酶、磷酸酶以及脱氢酶)活性与草甘膦间的关系, 计算并得到了能够表征土壤轻度污染的生态剂量值 ED_{10} 。结果表明: 非缓冲液法较好地反映了土壤酶的实际情况; 草甘膦总体上激活土壤脲酶、转化酶和脱氢酶活性, 最大增幅分别为 190%、1 372% 和 42%; 抑制磷酸酶活性, 最大幅度为 35%; 磷酸酶与草甘膦间为完全抑制作用机理; 激活脱氢酶活性揭示出草甘膦导致了土壤中微生物活性增强, 从侧面反映出草甘膦是一种毒性较低的农药。计算获得 4 类供试土壤褐土、黄绵土、风沙土和红壤 ED_{10} 值分别为 168.3、438.5、35.1 和 141.4 $mg \cdot kg^{-1}$; 在一定程度上用土壤酶活性比生物来表征土壤污染程度更敏感。土壤性质对草甘膦的毒性有重要影响。

关键词: 草甘膦; 土壤酶; 生态剂量; 效应

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)04-0680-06

Effect of Glyphosate on Soil Enzyme

HU Lei¹, HE Wen-xiang^{2,3}, WANG Xu-dong², ZHENG Fen-li^{2,3}

(1. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Glyphosate was one of the largest amount pesticides used in the world. It is an important scientific project to study its environmental toxicity. By simulation, the relationship between glyphosate and enzymatic activity (such as urease, invertase, phosphatase and dehydrogenase) in four tested soil types (cinnamon soil, loessal soil, sandy soil and red soil) was studied in this paper. And the ecological dose value (ED_{10}) was calculated for assessing light contamination of soil. The results showed as follow, the non-buffer method was better to reflect real soil enzymatic activity than buffer method. Glyphosate activated the activities of urease, invertase and dehydrogenase as a whole and the most increasing rates were 190%, 1 372% and 42% respectively. While the activity of phosphatase in soil had been inhibited, and the drop rate was 35%. The reaction mechanism between phosphatase and glyphosate was fully inhibited. Glyphosate could strengthen the microbe activity because of activation of dehydrogenase, it was induced that glyphosate was a less toxicity pesticide. Ecological dose ED_{10} of the four soil types were 168.3, 438.5, 35.1 and 141.4 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. Soil enzymatic activity was more sensitive than that of biology to monitor soil polluted by glyphosate. Soil properties had a considerable influence on the toxicity of glyphosate.

Keywords: glyphosate; soil enzyme; ecological dose; effect

草甘膦($C_3H_8NO_3P$)是种高效、低毒、广谱和内吸

传导、非选择性叶面喷施的除草剂^[1], 主要控制一年和多年生杂草。自 20 世纪 70 年代问世以来, 年销售量以 20% 速度增加, 目前已成为我国乃至全世界应用最广、使用量最大的除草剂, 预计全球 2010 年需求将达 100 万 t^[2-3]。

土壤酶是土壤的三大组成部分之一, 参与了土壤中绝大多数生化过程, 在营养物质转化、能量代谢、污染物质的净化等方面发挥着重要的作用^[4-5]。农药施用

收稿日期: 2008-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(40301022); 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-YW-09-07); 西北农林科技大学创新团队(01140202); 西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”

作者简介: 呼 蕾(1982—), 女, 陕西延安人, 硕士生, 从事土壤生态毒理方面研究。E-mail: huleiyangling@126.com

通讯作者: 和文祥 E-mail: wxhe1968@163.com

后,高达 70%左右进入土壤^[3],必然和土壤酶发生反应,因此农药污染后土壤酶活性特征变化的研究,是目前土壤学和环境学关注的热点问题之一。国内外学者研究表明,土壤酶与农药的关系有激活、抑制和无关 3 种;土壤酶活性在一定程度上可反映土壤受农药污染的程度^[6-10]。但在此方面还存在诸多不足之处:一是草甘膦多开展的是环境行为研究,鲜见其对土壤酶影响的报道,且结果也不一致。如王玉军等^[11]认为草甘膦抑制土壤脲酶活性,当浓度为 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,酶活性降幅达 95%;而 Sannino F 等^[12]则发现草甘膦激活土壤脲酶活性。二是在土壤酶测定方法中,大多采用缓冲液法来完成,但在很多情况下应使用非缓冲液法,因为它更能准确地反映土壤中酶的真实情况^[13]。为此本文拟采用非缓冲液法,对草甘膦与土壤 4 种主要酶类(转化酶、脲酶、磷酸酶和脱氢酶)活性的关系进行研究,了解二者间的关系,最终为生产实践中合理施用农药、监测污染等提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试土样

采自陕西渭南、延安、榆林和江西鹰潭的共 11 个土样。采样时,先去除 0~5 cm 表层后,采集 5~15 cm 土样,混匀,风干,过 1 mm 尼龙筛备用。常规方法测定土壤理化性质^[14],结果见表 1。

1.2 试剂

草甘膦为美国孟山都(Monsanto)公司制造的 74.7%水溶性粒剂。

1.3 试验方法

向 5.00 g 土样中加入不同浓度(0、50、100、250、

500、1 000 和 $2\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)草甘膦溶液 5 mL 静置 30 min 后,添加底物和水溶液^[4], 37°C 恒温培养,并设置无基质和无土样对照。定时取样,采用靛酚蓝、3,5-二硝基水杨酸、磷酸苯二钠和 TTC 比色法分别测定脲酶、转化酶、磷酸酶和脱氢酶的活性^[4-5],活性单位分别以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、葡萄糖、酚和 TPF 的量($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)来表示。

1.4 数据分析

采用 EXCEL 和 DPS 7.05 软件对数据进行线性拟合、相关系数的计算,并计算获得生态剂量 ED_{10} (Ecological dose 10,是指土壤酶活性变化 10%时外界污染物的浓度,可表征土壤受到污染物轻微污染时的浓度^[15-16])。

2 结果与分析

2.1 草甘膦对土壤脲酶活性的影响

土壤脲酶作为酰胺酶,可水解尿素为氨和二氧化碳,是氮素转化的重要酶类。由供试土壤脲酶活性(表 2)看出:(1)在未加农药时,同一类型土壤的脲酶活性随有机质增加而增大,这是由于土壤酶是以吸附态与有机质和粘粒结合存在的缘故^[13]。(2)草甘膦使得除 8 和 10 号两土样外的其余供试土壤脲酶活性增加,表明草甘膦总体上激活土壤脲酶,但增幅随土样有所差异,如草甘膦浓度 $2\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,11 号和 1 号土样脲酶活性增幅分别为 190%和 8%,两者相差 23.75 倍。(3)随农药浓度增加,供试 11 个土样中 9 个的脲酶活性呈先增加后降低的变化趋势。这与 Sannion (2001)^[12]的研究较为一致,他发现草甘膦浓度为 1.5 mmol 时,22 个土样中除两个土样脲酶受到抑制(降幅为 34%和 43%)外,其余土样的脲酶受到激活,最

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of soils tested

土样	采样地点	编号	砂粒/ %	粉粒/ %	粘粒/ %	有机质 OM/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 TN/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 TP/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 AN/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
褐土	渭南	1	48.02	34	17.98	25.46	1.75	1.05	107.6	8.28	12.09
		2	62.7	17.54	19.76	13.28	1.26	0.73	34.7	8.12	6.25
		3	55.8	24.23	19.97	8.69	0.53	0.5	43.45	8.43	6.71
黄绵土	延安	4	58.56	24.75	16.68	10.38	0.78	0.63	85.19	8.36	6.59
		5	59.53	21.08	19.39	7.4	1.01	0.58	90.51	8.25	17.44
		6	64.42	16.92	18.67	4.54	1.01	0.55	51.59	8.49	14
风沙土	榆林	7	74.02	13.4	12.58	10.96	0.58	0.28	78.77	8.14	2.45
		8	79.18	11.12	9.7	9.2	0.44	0.29	62.01	8.06	7.86
		9	79.15	11.45	9.4	7.14	0.38	0.26	27.16	8.27	8.29
红壤	鹰潭	10	46.76	17.16	36.08	20.02	1.43	0.66	126.7	6.22	14.48
		11	36.69	17.49	45.82	9.6	0.83	0.34	57.38	5.65	13.22

表 2 供试土壤脲酶活性(μg·g⁻¹·h⁻¹)

Table 2 Urease activity of soils tested(μg·g⁻¹·h⁻¹)

浓度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	68.1	61.3	25.8	31.8	37.1	31.3	79.1	71.7	69.3	15.0	3.9
50	71.9	64.9	27.7	32.9	42.3	34.1	80.5	53.5	75.3	10.4	4.1
100	72.1	68.8	26.8	32.2	41.7	33.9	88.9	51.6	75.3	8.0	4.7
250	75.1	66.0	27.9	34.3	43.7	29.1	97.9	51.1	62.8	9.4	7.3
500	—	67.6	29.8	39.3	43.7	29.9	100.8	54.8	69.9	13.1	9.9
1 000	76.9	77.8	31.1	44.6	51.0	34.7	105.1	59.2	77.3	13.8	10.4
2 000	73.7	73.8	31.7	35.3	42.3	35.0	107.4	55.3	81.0	13.9	11.4

大增幅达 9.24 倍;而与王玉军等^[11]结果差异的主要原因可能是其供试农药浓度较低(约 850 mg·kg⁻¹),同时采用的是乌栅土等缘故;此外本论文采用的是非缓冲液法,与上述文献报道中的缓冲液法不同造成的。(4)采用 $U=\beta_1\times C+\beta_0$ 模型对草甘膦浓度(C)和脲酶活性(U)进行拟合,结果(表 3)表明,仅 4 个土样达到显著或极显著正相关,揭示出在供试浓度范围内,草甘膦对土壤脲酶活性的定量规律不明显。(5)计算获得 11 号和 2 号土壤脲酶活性的 ED_{10} 值分别为 141.4 和 1 127.0 mg·kg⁻¹。此值与戴宝江等(2007)^[17]得到的大鼠口服 LD_{50} 为 4 300 mg·kg⁻¹,家兔经皮 $LD_{50}>5\ 000$ mg·kg⁻¹ 比较,11 号土样轻度污染时的草甘膦剂量仅为大鼠中度污染剂量的 1/30,揭示出采用土壤酶活性来探讨草甘膦的生态毒理效应可能会更敏感。

2.2 草甘膦对土壤转化酶活性的影响

自然界碳素转化的方式是多种多样的,蔗糖酶是其转化作用的一个重要酶类。供试土样转化酶活性(表 4)显示:(1)草甘膦对转化酶总体呈激活作用,除 10 号外,其余土样的转化酶活性显著增加,最大增幅为 9 号风沙土的 13.72 倍。Sannion^[12]也发现绝大多数土样的转化酶活性激活幅度为 4%~204%。(2)对农药浓度(C)与转化酶活性(U)进行线性拟合(表 5)表明,

7 个土样达到了显著或极显著正相关,揭示出转化酶活性可在一定程度上揭示土壤的污染程度。(3)由土

表 3 土壤脲酶与草甘膦关系拟合结果

Table 3 The regression equations between urease activity of soil and concentrations of glyphosate

土样	拟合方程	相关系数	生态剂量 $ED_{10}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
2	$U=0.005\ 8\times C+65.36$	0.755*	1 127.0
3	$U=0.002\ 7\times C+27.17$	0.888**	1 006.2
7	$U=0.012\ 7\times C+87.16$	0.801*	686.3
11	$U=0.003\ 7\times C+5.30$	0.849**	141.4

注:自由度 $n-2=5$, $r_{0.05}=0.754$, $r_{0.01}=0.874$ 。下同。

Note: Freedom $n-2=5$, $r_{0.05}=0.754$, $r_{0.01}=0.874$, it is the same with below tables.

表 5 土壤转化酶与草甘膦关系拟合结果

Table 5 The regression equations between invertase activity of soil and concentrations of glyphosat

土样	拟合方程	相关系数	生态剂量 $ED_{10}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	$U=0.054\times C+707.15$	0.945**	1 309.7
2	$U=0.081\times C+403.38$	0.985**	492.8
3	$U=0.033\times C+55.36$	0.913**	168.3
5	$U=0.054\times C+315.84$	0.787*	588.6
7	$U=0.055\times C+153.40$	0.952**	274.4
8	$U=0.074\times C+160.57$	0.935**	214.4
9	$U=0.119\times C+41.77$	0.872**	35.1

表 4 供试土壤转化酶活性(μg·g⁻¹·h⁻¹)

Table 4 Invertase activity of soils tested(μg·g⁻¹·h⁻¹)

浓度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	680.0	410.7	40.4	250.8	266.0	213.3	160.8	153.8	16.3	185.7	156.1
50	725.8	418.4	55.9	305.3	370.6	234.9	175.6	166.2	29.5	178.5	177.1
100	722.2	404.0	60.6	327.2	309.4	242.1	152.3	174.0	31.8	171.7	177.1
250	723.5	426.1	68.4	270.4	342.8	257.8	166.2	172.5	41.9	183.3	211.3
500	736.0	439.0	73.0	282.4	337.4	247.5	163.1	177.1	191.1	192.7	211.3
1 000	758.2	467.7	106.4	294.5	374.2	236.2	198.9	277.3	205.9	178.7	197.3
2 000	814.9	577.0	111.1	323.6	419.7	261.4	275.0	295.2	240.0	195.8	208.2

壤转化酶的 ED_{10} 值(表 5)看出,褐土和风沙土转化酶 ED_{10} 范围分别为 $168.3 \sim 1309.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $35.1 \sim 274.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,结合土壤理化性质(表 1),反映出土样转化酶的 ED_{10} 值随有机质含量降低而减小。

这主要是由于有机质含量较高的土壤,对转化酶的保护和对农药的缓冲作用较强,同时土壤对草甘膦的吸附主要取决于土壤有机质、粘粒、CEC 等含量的高低^[18-19],这样最终导致土壤酶对草甘膦的反应较迟钝,表观上获得的生态剂量值也就较大。

2.3 草甘膦对土壤磷酸酶活性的影响

磷酸酶是能将有机磷转化为植物可吸收的无机磷的土壤酶,它有酸性、中性和碱性三类。本研究的

非缓冲液法测定的是土壤磷酸酶总量,结果(表 6)显示:(1)同一类型土壤,磷酸酶活性随肥力增高而增加;(2)随草甘膦浓度增加,大多数土壤磷酸酶总体呈下降的趋势,最大降幅达到 35%,表明草甘膦抑制了磷酸酶活性。Sannino 等得到^[12]的降幅为 5%~98%。(3)采用两种模型拟合二者关系,结果发现除 8 号土样外,其余土样用模型 I 和 II(表 7)拟合均达到显著或极显著相关,这说明一方面土壤磷酸酶活性可较好地揭示土壤草甘膦的污染程度,另一方面二者的作用机理为完全抑制作用^[20]。因据 Speir 等^[20]试验发现污染物与土壤酶活性之间的关系符合模型 II,则反映出外源物对土壤酶作用是完全抑制作用(Fully

表 6 供试土壤磷酸酶活性($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

Table 6 Phosphatase activity of the soils tested($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

浓度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	48.3	23.3	19.3	19.2	29.6	19.3	25.7	20.5	21.0	122.3	57.5
50	48.4	24.5	18.9	23.9	28.5	19.1	24.7	20.4	20.2	121.2	52.5
100	47.3	24.7	22.0	20.9	29.1	19.0	25.2	20.2	20.4	116.7	55.7
250	46.6	23.2	18.8	20.6	25.1	20.8	22.4	19.6	18.0	123.8	51.2
500	46.0	21.9	17.7	18.7	26.9	17.3	22.6	18.2	17.6	121.4	53.9
1000	42.2	20.8	16.3	17.2	24.9	15.8	19.5	16.7	15.8	116.8	54.4
2000	38.5	17.8	15.4	16.7	19.8	13.2	18.2	15.1	13.7	112.1	—

表 7 草甘膦浓度与磷酸酶活性的拟合方程

Table 7 The regression equations between concentration of glyphosate and phosphatase activity of soil

方程		参数	土样编号										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	$U=Ax+B$	$A(\times 10^{-2})$	-0.50	-0.33	-0.25	-0.25	-0.44	-0.33	-0.37	-0.28	-0.35	-0.45	
		B	48.10	24.12	19.72	21.01	28.73	19.66	24.68	20.23	20.06	121.73	
		r	-0.989**	-0.967**	-0.82***	-0.755*	-0.938*	-0.937**	-0.927**	-0.975**	-0.949**	-0.802*	-0.148
		ED_{10}	966.5	742.0	803.1	824.5	651.9	588.2	666.0	717.7	570.9	2 677.6	
II	$U=B/(1+Ax)$	$A(\times 10^{-3})$	0.13	0.18	0.16	0.15	0.22	0.25	0.20	0.19	0.25	0.04	0.05
		B	48.28	24.29	19.70	20.91	29.02	19.89	24.76	20.34	20.21	121.75	
		r	0.994**	0.980**	0.881**	0.816*	0.952**	0.968**	0.952**	0.989**	0.952**	0.813*	0.127
		ED_{10}	863.1	611.3	718.6	758.7	504.2	438.5	555.0	600.4	443.0	2 751.8	—

表 8 供试土壤脱氢酶活性($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

Table 8 Dehydrogenase activity of the soils tested($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

浓度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	116.89	75.79	77.22	46.45	74.01	47.99	97.88	73.53	84.58	143.38	56.31
50	124.25	76.5	86.6	52.62	77.69	48.11	107.86	79.71	37.66	141.12	56.66
100	141.83	88.74	83.39	58.92	75.07	56.07	105.13	73.18	26.25	145.64	54.05
250	125.32	84.93	81.26	51.91	76.86	52.98	101.92	74.48	43.48	130.91	66.05
500	141.95	83.75	82.8	57.97	93.49	49.42	73.41	81.73	57.25	135.78	59.16
1 000	136.96	101.21	93.97	64.03	94.56	67	78.4	71.16	54.88	128.41	57.97
2 000	123.42	102.28	81.61	65.93	95.39	54.76	70.32	75.31	59.04	120.93	68.9

inhibition)。此外 Segal^[21]认为草甘膦中的磷酸基团的存在抑制磷酸酶活性,草甘膦对磷酸酶与蒙脱石复合体的作用表现为典型的竞争性抑制作用;Speir 等^[22]研究发现土壤磷酸酶活性受到无机磷和磷肥的抑制作用。(4)由模型Ⅱ得到的各土样 ED_{10} 值(表 7)为:褐土 $611.3\sim 863.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 黄绵土 $438.5\sim 758.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 风沙土 $443.0\sim 600.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。(5)10 号土磷酸酶活性的生态剂量 ED_{10} 为 $2751.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远远高于其他几种供试土样,可能是酸性红壤的缘故。因为土壤 pH 越低,草甘膦的吸附量越多,那么游离草甘膦量越少,所以对土壤酶的影响会较小;这也佐证了王玉军等人得出的土壤 pH 与草甘膦吸附量呈显著负相关的结论^[18]。

2.4 草甘膦对土壤脱氢酶活性的影响

土壤脱氢酶是土壤中微生物活性极其重要的关键酶,可作为反映微生物活性的指标^[23]。表 8 显示:(1)在供试农药浓度范围内,除 7、9、10 号土样外,其余土壤的脱氢酶活性均受到激活,这是由于草甘膦的生物毒性较弱,易被微生物降解转化,因而对微生物活性的毒性较小。(2)对二者关系的相关分析结果(表 9)表明,2 号、4 号、5 号土样脱氢酶活性与草甘膦浓度呈显著正相关,其余土样则不显著。这表明不同土样由于理化性质的巨大差异,结果导致土壤微生物活性较为复杂。可见草甘膦对土壤脱氢酶活性的定量关系不明显,还有待进一步研究。

综上所述,非缓冲液法测定的土壤酶活性能够更真实地反映土壤的实际情况;草甘膦的加入对土壤酶活性具有重要影响,激活土壤脲酶、转化酶和脱氢酶的活性,却抑制土壤磷酸酶活性,揭示出它们可在一定范围内表征土壤草甘膦的污染程度;对土壤磷酸酶的影响机理为完全抑制作用;计算获得了不同土壤草甘膦轻度污染时的生态剂量 ED_{10} 值,供试褐土、黄绵土、风沙土和红壤的临界浓度分别为 168.3 、 438.5 、 35.1 和 $141.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤酶活性比动物毒性结果等更敏感地反映出土壤中草甘膦

的污染状况;草甘膦导致微生物活性的增强,揭示出草甘膦的毒性较弱,为低毒害农药品种。草甘膦的生态毒性与土壤性质特别是有机质、pH 值等密切相关。

参考文献:

- [1] 陈 云. 除草剂草甘膦的性质和应用[J]. 湖北化工, 1995(2):10-11.
CHEN Yun. Properties and applications of herbicide glyphosate [J]. *Hubei Chemical*, 1995(2):10-11.
- [2] 傅定一. 草甘膦的第二次革命[J]. 农药, 2002, 41 (10):1-5.
FU Ding-yi. The second revolution of glyphosate [J]. *Agrochemicals*, 2002, 41(10):1-5.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 1999.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 1999.
- [4] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1987.
GUAN Song-yin. Soil enzymes and research[M]. Beijing: Agricultural Publishing House. 1987.
- [5] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社, 1987.
ZHOU Li-kai. Soil enzymes[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [6] 和文祥, 陈会明, 冯贵颖, 等. 汞铬砷元素污染土壤的酶监测研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20 (3):338-343.
HE Wen-xiang, CHEN Hui-ming, FENG Gui-ying, et al. Study on enzyme index in soils polluted by mercury, chromium and arsenic[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3):338-343.
- [7] 和文祥, 马爱生, 武永军, 等. 砷对土壤脲酶活性影响的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5):895-898.
HE Wen-xiang, MA Ai-sheng, WU Yong-jun, et al. Effect of arsenic on soil urease activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5):895-898.
- [8] 和文祥, 朱铭菡, 张一平. 土壤酶与重金属关系的研究现状[J]. 土壤与环境, 2000, 9(2):139-142.
HE Wen-xiang, ZHU Ming-e, ZHANG Yi-ping. Recent advance in relationship between soil enzymes and heavy metals[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2):139-142.
- [9] 尹 君, 高如泰, 刘文菊, 等. 土壤酶活性与土壤 Cd 污染评价指标[J]. 农业环境保护, 1999, 18(3):130-132.
YIN Jun, GAO Ru-tai, LIU Wen-ju, et al. Soil enzyme activities and evaluation index of Cd soil pollution[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1999, 18(3):130-132.
- [10] 杨春璐, 孙铁珩, 和文祥, 等. 农药对土壤脲酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7):1354-1356.
YANG Chun-lu, SUN Tie-heng, HE Wen-xiang, et al. Effects of pesticides on soil urease activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (7):1354-1356.
- [11] 王玉军, 周东美, 孙瑞娟, 等. 土壤中草甘膦与镉的交互作用对 3 种土壤酶活性的影响[J]. 生态毒理学报, 2006(1):58-63.
WANG Yu-jun, ZHOU Dong-mei, SUN Rui-juan, et al. Effects of glyphosate and Cd interaction on the activities of several soil enzymes[J]. *Asian Journal Ecotoxicology*, 2006(1):58-63.

表 9 土壤脱氢酶活性与草甘膦关系拟合结果

Table 9 The regression equations between dehydrogenase activity of soil and concentration of glyphosate

土样	拟合方程	相关系数	生态剂量 $ED_{10}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
2	$U=0.005\ 8\times C+65.36$	0.858*	635.7
4	$U=0.002\ 7\times C+27.17$	0.818*	668.8
5	$U=0.012\ 7\times C+87.16$	0.818*	686.7

- [12] Gianfreda L, Sannino F. Pesticide influence on soil enzymatic activities[J]. *Chemosphere*, 2001, 45:417-425.
- [13] Burns R G. Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(5):423-427.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000.
- [15] Doelman P, Haanstra L. Short- and long-term effects of heavy metals on phosphatase activity in soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1989 (10):235-241.
- [16] Moreno José L, Hernández Teresa, Pérez Aurelia et al. Toxicity of cadmium to soil microbial activity: effect of sewage sludge addition to soil on the ecological dose[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(2):149-158.
- [17] 戴宝江, 朱 秦, 任新峰. 草甘膦的特性、安全性及其应用评述[J]. 中国农药, 2006(3):31-34.
DAI Bao-jiang, ZHU Qin, REN Xin-feng. Properties, securities and applications of glyphosate[J]. *China Pesticides*, 2006(3):31-34.
- [18] 王玉军, 周东美, 孙瑞娟, 等. 除草剂草甘膦在几种土壤和矿物上的吸附研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):780-785.
WANG Yu-jun, ZHOU Dong-mei, SUN Rui-juan, et al. Adsorption of glyphosate on soils and minerals[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):780-785.
- [19] 杨宏伟, 郭博书, 嘎尔迪. 除草剂草甘膦在土壤中的吸附行为[J]. 环境科学, 2004, 25(5):158-162.
YANG Hong-wei, GUO Bo-shu, GA Er-di. Adsorption behaviors of herbicide glyphosate on soils[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(5):158-162.
- [20] Speir T W, Kettles H A, Parshotam A, et al. A simple kinetic approach to derive the ecological dose value, ED₅₀, for the assessment of Cr(VI) toxicity to soil biological properties[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6):801-810.
- [21] Segel I H. Enzyme kinetic[M]. Wiley, New York. 1975.
- [22] Speir T W, Ross D F. Soil phosphatase and sulphatase[C]// Burns, R. G. (Ed.), Soil enzymes. London: Academic Press, 1978:197-250.
- [23] 解 军, 祁 锋, 裴海燕, 等. 脱氢酶活性检测方法及其在环境监测中的应用等[J]. 中国环境监测, 2006, 22(5):19-24.
XIE Jun, QI Feng, PEI Hai-yan, et al. Determining method of dehydrogenase activity and its application in environmental monitoring[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, 22(5):19-24.