

汞和镉对土壤脲酶活性影响*

和文祥 黄英锋 朱铭莪 张一平

(西北农林科技大学资源与环境科学系, 杨凌, 陕西 712100)

摘 要 研究表明, 汞、镉对土壤脲酶活性具有显著的抑制作用, 抑制幅度和强度分别以汞镉和汞为最大; 相关分析显示, 脲酶活性可作为土壤 Hg 及 Hg+ Cd 污染程度的生化监测指标; 当 Hg、Cd 含量分别达到 $1.613 \sim 2.647 \text{mg kg}^{-1}$ 和 477.78mg kg^{-1} 时, 土壤已受到严重污染; 在汞镉复合条件下, 抑制仍以单独影响为主, 且汞、镉间存在较弱的拮抗作用; 温度和尿素浓度升高, 可增强重金属对土壤脲酶活性的抑制作用。

关键词 土壤脲酶, 汞, 镉

中图分类号 S154.2

重金属伴随人类活动进入土壤, 其难移动性导致大量累积^[1~3], 造成土壤污染, 从而对植物、微生物、动物及人类活动产生潜在威胁。微生物及其分泌酶在营养元素转化、土壤污染修复等过程中具有重要作用^[4~5], 重金属的积累必然会破坏土壤固有微生物区系及酶活性, 减弱土壤生物的作用, 最终使得土壤肥力和质量降低。故在重金属生态毒理、污染监测评价及修复等方面研究中土壤酶是国内外关注的主要课题之一。近年来^[6~8]先后提出了脲酶、转化酶、磷酸酶等重金属污染指标, 但研究大多是单因素试验, 鲜见对复合作用的报道, 且结果差异较大。为此, 本文通过 Hg、Cd 单因子及复合条件下对土壤脲酶活性影响的研究, 探讨土壤脲酶活性与 Hg、Cd 间的关系, 最终为环境保护和监测提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土样

取自西北农林科技大学蔬菜站的土。去除 0~5cm 表层, 五点法采 5~20cm 土样, 风干, 过 1mm 尼龙筛, 保存备用。

常规方法^[9]测定土壤基本性质: 粘粒 125.9g kg^{-1} , 有机质 17.65g kg^{-1} , 全氮 1.502g kg^{-1} , 全磷 1.625g kg^{-1} , 碱解氮 $137.592 \text{mg kg}^{-1}$, 速效磷 345.52mg kg^{-1} , pH 为 8.12; 土壤重金属全量^[10]为 Hg 0.074 (硫酸—高锰酸钾法消化, 冷原子荧光测汞仪测定)、Cd 0.348 、Cr 62.5 、Pb 22.30mg kg^{-1} (浓盐酸—浓硝酸—高氯酸消化, 原子分光光度计法), 重金属背景值^[11]相应分别为 0.099、0.121、63.70 和 18.50mg kg^{-1} 。

* 国家自然科学基金资助项目(批准号 39370148)

收稿日期: 2000-04-06; 收到修改稿日期: 2000-08-21

1.2 处理

向 5.00g 土样中加 1ml 甲苯后 15min, 添加 5ml 重金属溶液(表 1) 30min^[12] 后, 加入 10ml 不同浓度 (0.000, 0.010, 0.025, 0.050, 0.100mol L⁻¹) 尿素溶液和 20ml pH6.7 的柠檬酸盐缓冲液共 65 个不同处理, 置于水浴中培养, 靛酚蓝比色法测定脲酶活性, 单位以 NH₃-N μg g⁻¹ h⁻¹ 表示。重复三次, 并设无土壤处理作为空白对照。

表 1 供试土壤中重金属浓度

Table 1 Concentration of heavy metals added in soil tested

处理 Treatment	浓度 Concentration (mg kg ⁻¹)			
Hg (HgCl ₂)	0.3125	0.625	1.250	2.500
Cd (CdSO ₄)	25.00	62.50	125.00	187.5
Hg+ Cd (HgCl ₂ + CdSO ₄)	25.3125	63.125	126.25	190.0

2 结果与讨论

2.1 重金属对土壤脲酶活性定浓抑制率的影响

许多学者^[5, 13, 14] 研究发现土壤脲酶酶促反应的最适温度为 60℃~ 70℃, 同时由于常温下土壤脲酶活性与 60℃时的变化规律相同^[14], 只是幅度较小, 所以为了更清楚地了解土壤脲酶活性受汞镉影响情况, 本文主要以 60℃为例对其间关系进行探讨。

表 2 显示, 与未加重金属的对照相比, 重金属处理的土壤脲酶活性降低, 且不同种类重金属导致酶活性降幅有所差别, 表明汞镉对土壤脲酶具有抑制作用。为定量描述在一定重金属浓度下的抑制作用, 采用脲酶活性抑制率 (简称定浓抑制率 = $1 - \frac{\text{处理样品的脲酶活性}}{\text{对照样品脲酶活性}} \times 100\%$) 予以表征, 其总体呈现 Hg+ Cd > Hg > Cd 的规律性变化, 反映出 Hg、Cd 复合条件下脲酶活性受抑制的幅度最大, 在单因素中 Hg 大于 Cd。同时, 随重金属浓度增加, 酶活性值降低, 定浓抑制率增大。

表 2 60℃下供试土壤脲酶活性

Table 2 Urease activity in tested soils under 60℃(μg g⁻¹ h⁻¹)

重金属 Heavy metals		不同尿素浓度下脲酶活性 Urease activity under different urea concentrations							
种类	浓度 (mg kg ⁻¹)	0.010mol L ⁻¹		0.025mol L ⁻¹		0.050mol L ⁻¹		0.100mol L ⁻¹	
		活性	定浓抑制率(%)	活性	定浓抑制率(%)	活性	定浓抑制率(%)	活性	定浓抑制率(%)
CK	0.00	29.74	0.00	52.92	0.00	96.67	0.00	130.79	0.00
Hg	0.3125	33.52	-12.72	47.88	9.52	74.09	23.83	112.65	13.87
	0.625	23.18	22.03	49.64	6.19	63.50	34.72	114.91	12.14
	1.25	24.19	18.64	42.50	19.70	76.42	21.43	83.04	36.50
	2.50	18.65	37.29	31.25	40.95	45.36	53.37	58.97	54.91
Cd	25.0	27.47	6.42	45.36	14.29	73.58	24.25	107.10	18.11
	62.5	25.70	13.56	45.36	14.29	66.53	31.61	86.18	34.10
	125.0	25.96	12.71	46.37	12.38	65.27	32.90	87.19	33.33
	187.5	27.22	8.47	44.60	15.71	67.28	30.83	97.02	25.82

续表

重金属 Heavy metals		不同尿素浓度下脲酶活性 Urease activity under different urea concentrations							
		0.010mol L ⁻¹		0.025mol L ⁻¹		0.050mol L ⁻¹		0.100mol L ⁻¹	
种类	浓度 (mg kg ⁻¹)	活性	定浓抑制率(%)	活性	定浓抑制率(%)	活性	定浓抑制率(%)	活性	定浓抑制率(%)
Hg+ Cd	25.3125	25.70	13.56	35.78	32.38	60.48	37.82	89.96	31.21
	63.125	20.16	32.20	32.26	39.05	50.40	48.19	65.27	50.10
	126.25	16.38	44.92	26.71	49.63	33.00	66.06	45.36	65.32
	190.0	15.12	49.15	18.40	65.24	21.67	77.72	27.47	79.00

注: 定浓抑制率正值表示抑制, 负值为激活

加里乌林等^[7]按照土壤酶活性的降幅(定浓抑制率)将污染程度划分成三个等级: 当定浓抑制率小于25%轻度污染, 25%~45%中度污染, 大于45%重度污染。参照表2可看出, 在0.100mol L⁻¹尿素浓度下, Hg 2.5mg kg⁻¹、Hg+ Cd63.125~190.0mg kg⁻¹的四个处理的定浓抑制率达到50%以上, 为严重污染, 其余处理为轻度或中度污染。可见脲酶活性的大小在一定程度上可反映土壤受重金属污染的程度。

为了解Hg、Cd共存对土壤脲酶活性(U)是否存在交互作用^[15], 采用下式计算了酶活性的净变化量(ΔU):

$$\Delta U = (U_{\text{Hg+ Cd}} - U_{\text{ck}}) - (U_{\text{Hg}} - U_{\text{ck}}) - (U_{\text{Cd}} - U_{\text{ck}})$$

如果 $\Delta U = 0$, Hg、Cd间无交互作用; $\Delta U > 0$, 存在拮抗作用; $\Delta U < 0$, 为激活作用。

由表3看出, Hg、Cd对脲酶活性具有交互作用: 20℃和40℃时为激活作用, 其余温度时为拮抗作用, 总体汞镉表现为较弱拮抗关系。可见在供试重金属浓度范围内, 由于土壤的有机质含量较高(17.65g kg⁻¹), 对重金属吸附、固定及对土壤酶保护的能力较强^[1, 3, 16], 导致重金属的交互作用较弱。

表3 不同温度下脲酶活性的净变化量 $\Delta U(\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1})$

Table 3 Net change in urease activity under different temperatures

Hg+ Cd	不同温度下脲酶活性的净变化量 Net change in urease activity under different temperatures					
	20℃	30℃	40℃	50℃	60℃	70℃
25.3125	-5.04	9.58	-13.34	-15.12	1.01	17.14
63.125	-4.79	14.87	-10.57	14.62	-5.04	10.84
126.25	-8.57	12.07	-11.08	5.54	5.91	22.67
190.0	-3.02	40.32	8.33	-7.81	2.27	42.34

注: 尿素浓度为0.100mol L⁻¹

表4 不同温度下土壤脲酶活性的定浓抑制率

Table 4 Inhibition rate of urease activity under different temperatures (%)

重金属 Heavy metal		不同温度下脲酶活性的定浓抑制率 Inhibition rate of urease activity under different temperatures				
		20℃	30℃	40℃	50℃	70℃
种类	浓度(mg kg ⁻¹)					
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hg	0.3125	7.41	31.44	1.46	14.67	9.96
	0.625	17.59	45.36	17.24	21.87	10.78

续表

重金属 Heavy metal		不同温度下脲酶活性的定浓抑制率 Inhibition rate of urease activity under different temperatures				
种类	浓度(mg kg ⁻¹)	20℃	30℃	40℃	50℃	70℃
Hg	1.25	16.67	55.00	29.68	35.20	35.45
	2.50	50.00	74.84	74.65	37.60	61.93
Cd	25.0	2.78	20.63	-8.10	-4.27	39.54
	62.5	5.55	29.38	0.50	29.07	40.52
	125.0	13.89	18.56	-0.40	31.47	41.01
	187.5	16.67	30.93	7.6	31.20	41.83
Hg+ Cd	25.3125	23.15	32.47	18.68	26.40	38.40
	63.125	40.74	44.33	37.81	35.47	44.28
	126.25	62.04	65.33	50.25	60.80	61.76
	190.0	77.78	74.61	66.51	77.07	76.31

注: 尿素浓度为 0.100mol L⁻¹

由表 2 看出, 随尿素浓度增加, 土壤脲酶活性(除个别汞处理外)的定浓抑制率总体呈增大趋势, 反映出尿素浓度已成为影响土壤脲酶活性的主要限制因素之一; 随温度升高(表 2、4), 定浓抑制率变化规律不明显。

2.2 重金属对土壤脲酶活性变浓抑制率的影响

表 2、4 反映出随重金属浓度(C)增加, 土壤脲酶活性(U)降低。为此, 采用 $U = \beta_0 + \beta_1 \times C$ 进行拟合, 结果(表 5、6)显示, 除 Cd 处理外, 脲酶活性与其余重金属处理间均达显著或极显著负相关水平, 表明脲酶活性可作为土壤受汞或汞、镉多元素复合污染程度的生态监测指标。方程系数 β 表征重金属浓度引起脲酶活性的变化值, 其具有强度含义, 简称为变浓抑制率($\frac{dU}{dC}$); 负相关则佐证了 Hg、Cd 对土壤脲酶的抑制作用。

表 5 重金属浓度与土壤脲酶活性关系拟合式

Table 5 Fitting equation between urease activity and heavy metal concentration

温度 Temperature	重金属 Heavy metal	拟合方程 Fitting equation	相关系数(r) Correlation coefficient	ED ₅₀ (mg kg ⁻¹)
20℃	Hg	$U = 27.008 - 5.101 \times C_{Hg}$	-0.969 ^{**}	2.647
	Cd	$U = 27.711 - 0.029 \times C_{Cd}$	-0.956 [*]	477.78
	Hg+ Cd	$U = 24.678 - 0.1056 \times C_{Hg+ Cd}$	-0.974 ^{**}	
30℃	Hg	$U = 40.465 - 12.544 \times C_{Hg}$	-0.907 [*]	1.613
	Cd	$U = 216.872 - 0.264 \times C_{Cd}$	-0.666	-
	Hg+ Cd	$U = 41.765 - 0.174 \times C_{Hg+ Cd}$	-0.935 [*]	
40℃	Hg	$U = 54.835 - 16.130 \times C_{Hg}$	-0.992 ^{***}	1.700
	Cd	$U = 55.949 - 0.112 \times C_{Cd}$	-0.185	-
	Hg+ Cd	$U = 48.363 - 0.173 \times C_{Hg+ Cd}$	-0.969 ^{**}	
50℃	Hg	$U = 86.027 - 13.003 \times C_{Hg}$	-0.880 [*]	3.308
	Cd	$U = 92.549 - 0.1803 \times C_{Cd}$	-0.818	-
	Hg+ Cd	$U = 85.740 - 0.358 \times C_{Hg+ Cd}$	-0.975 ^{**}	
70℃	Hg	$U = 154.158 - 38.787 \times C_{Hg}$	-0.991 ^{***}	1.987
	Cd	$U = 122.278 - 0.229 \times C_{Cd}$	-0.621	-
	Hg+ Cd	$U = 128.923 - 0.528 \times C_{Hg+ Cd}$	-0.919 [*]	

*、**、*** 分别代表 5%、1%、0.1% 显著水平; 尿素浓度为 0.100mol L⁻¹; ED₅₀: 土壤脲酶活性降幅为 50% 时的重金属含量

变浓抑制率 $Hg \gg Hg+ Cd > Cd$, 揭示出土壤脲酶活性对 Hg 反应极敏感, 即单位 Hg 浓度的增减导致脲酶活性的变幅最显著, 表明汞的生态毒性最强; 而对 Cd 的反应较迟钝。这可能是由于汞与脲酶分子活性部位- 巯基和含咪唑基的配位体等结合时, 能形成非常稳定的化学键, 而镉与巯基等形成络合物的稳定程度远小于汞^[6]所致。

由表5和表6可计算得到脲酶活性剧变抑制浓度^[3, 17, 18], ED_{50} 值 $Hg \ll Hg+ Cd < Cd$, 表明汞对土壤脲酶活性的生态毒性最强, 佐证了前述 Hg 的变浓抑制率较高, 土壤脲酶活性对 Hg 较敏感的结论, Cd 则较弱。在供试条件下, 脲酶活性 Hg、Cd 的抑制剧变浓度分别为 $1.613 \sim 2.647 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $477.78 \text{ mg kg}^{-1}$, 可作为本地区土壤严重污染的临界值, 供环境保护部门参考。

表6 重金属浓度与脲酶活性的拟合方程

Table 6 Fitting equations between urease activity and heavy metal concentration

重金属 Heavy metal	尿素浓度(mol L^{-1}) Urea concentration	拟合方程 Fitting equation	相关系数(r) Correlation coefficient	$ED_{50}(\text{mg kg}^{-1})$
Hg	0.010	$U = 30.505 - 4.959 \times C_{Hg}$	0.842	3.075
	0.025	$U = 52.745 - 8.434 \times C_{Hg}$	0.983*	3.127
	0.050	$U = 86.350 - 16.022 \times C_{Hg}$	0.834	2.695
	0.100	$U = 126.677 - 28.378 \times C_{Hg}$	0.976*	2.232
Cd	0.010	$U = 28.059 - 0.0106 \times C_{Cd}$	0.502	-
	0.025	$U = 49.121 - 0.027 \times C_{Cd}$	0.615	-
	0.050	$U = 83.275 - 0.121 \times C_{Cd}$	0.690	-
	0.100	$U = 113.693 - 0.150 \times C_{Cd}$	0.626	-
Hg+ Cd	0.010	$U = 27.548 - 0.0754 \times C_{Hg+ Cd}$	0.940*	-
	0.025	$U = 45.507 - 0.152 \times C_{Hg+ Cd}$	0.916*	-
	0.050	$U = 80.580 - 0.346 \times C_{Hg+ Cd}$	0.918*	-
	0.100	$U = 111.380 - 0.489 \times C_{Hg+ Cd}$	0.938*	-

注: 60℃时测定的结果

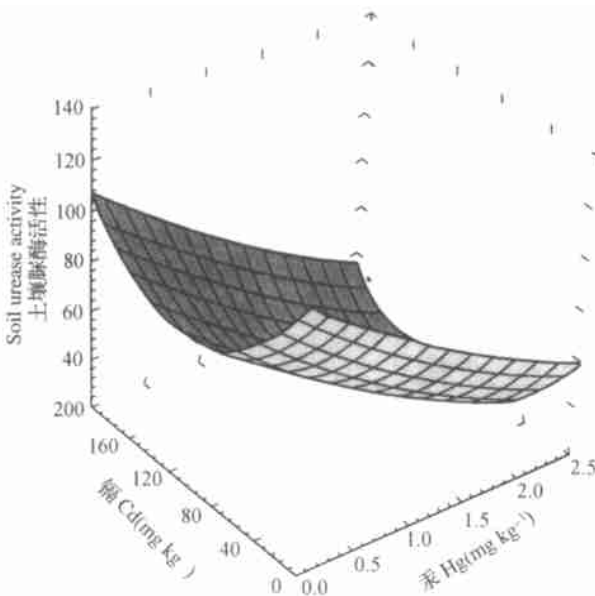


图1 60℃土壤脲酶活性与 Hg、Cd 间关系(0.100 mol L^{-1})

Fig. 1 Relationship between soil urease activity and Hg, Cd concentrations (60°C , 0.100 mol L^{-1})

此外随尿素浓度和温度升高, 脲酶活性的变浓抑制率增加, 抑制剧变浓度变化不明显, 这与其脲酶活性升高的变化规律一致。

在前面的讨论中, 脲酶活性的定浓和变浓抑制率分别呈现 $Hg+ Cd > Hg > Cd$ 和 $Hg \gg Hg+ Cd > Cd$ 的规律性变化。尽管二者顺序不一致, 但并不矛盾, 因为定浓揭示的是在重金属作用下酶活性的降幅, 由于 $Hg+ Cd$ 是两单独重金属浓度数量之和, 故抑制幅度最大; 而变浓则反映的是单位浓度重金属对脲酶活性的抑制强度, 混合样品由于 Cd 的浓度较高, Hg 的较低, 结果导致 Cd 较弱的抑制作用掩盖了 Hg 较强作用, 从而表现出 $Hg+ Cd$ 要远小于 Hg 处理。所以两概

念分别是从容量和强度的角度共同反映了土壤脲酶的抑制特征。

2.3 重金属对土壤脲酶活性偏浓抑制率的影响

由图 1 可看出, 在温度和尿素浓度一定时, Hg+ Cd 处理土壤的脲酶活性 (U) 实际是受 Hg、Cd 浓度 (C_{Hg} 、 C_{Cd}) 及两者复合作用的影响。为探讨 Hg+ Cd 复合作用对土壤脲酶活性的定量关系, 按照 $U = \beta_0 + \beta_1 \times C_{\text{Hg}} + \beta_2 \times C_{\text{Cd}} + \beta_3 \times C_{\text{Hg}}^2 + \beta_4 \times C_{\text{Cd}}^2 + \beta_5 \times C_{\text{Hg}} \times C_{\text{Cd}}$ 利用 Systat 统计软件采用逐步回归、删除不显著项的方法进行非线性拟合, 结果见表 7。其显示出方程均达到极显著相关水平, 表明此方程能较好地表征酶活性与 Hg、Cd 复合作用的定量关系。

表 7 土壤脲酶活性与 Hg、Cd 浓度拟合方程参数

Table 7 Coefficients of the fitting equation of soil urease activity and Hg、Cd concentrations

温度 Temperature	尿素浓度 (mol L ⁻¹) Urea concentration	拟合参数 Fitting parameters						相关系数(r) Correlation coefficient
		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	
20℃	0.010	13.841	-11.309	-	3.062	-	-	0.904**
	0.025	16.478	-10.883	0.018	3.207	-	0.002	0.956***
	0.050	24.463	-12.509	-0.122	2.841	-	-	0.939**
	0.100	29.092	-10.723	-0.102	1.799	0.0004	-	0.962***
30℃	0.010	18.513	-6.061	-	-	-	-	0.859**
	0.025	25.321	-14.077	-	2.790	-	-	0.898**
	0.050	32.681	-15.660	-	2.624	-	-	0.944***
	0.100	41.005	-22.895	-0.027	5.008	-	-	0.958***
40℃	0.010	20.238	-6.006	-	-	-	0.0126	0.881**
	0.025	24.811	-6.792	0.121	-	-0.0006	-	0.942***
	0.050	41.059	-17.268	-	2.661	-	-	0.956***
	0.100	51.504	-14.996	-	-	-	-	0.948***
50℃	0.010	27.255	-10.192	-0.045	2.531	-	-0.0026	0.940***
	0.025	35.992	-	-	-	-	-0.0572	0.764**
	0.050	64.742	-8.245	-0.307	-	0.0012	-0.0346	0.947***
	0.100	91.241	-36.839	-0.175	9.627	-	-0.0104	0.956***
60℃	0.010	30.609	-5.212	-0.130	-	0.0006	-	0.925**
	0.025	52.380	-9.640	-0.227	-	0.001	-	0.924**
	0.050	84.743	-15.643	-0.472	-	0.0022	-0.023	0.933**
	0.100	125.149	-28.274	-0.833	-	0.0038	-	0.984***
70℃	0.010	29.714	-5.957	-	2.034	-0.0002	-	0.914**
	0.025	53.561	-5.342	-0.095	-	-	-	0.889**
	0.050	94.718	-15.552	-0.594	-	0.0022	-	0.890**
	0.100	132.504	-	-0.974	-11.359	0.0044	-	0.933**

复合条件下单个重金属对脲酶活性的抑制强度, 可采用镉交汞抑制系数 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{\text{Cd}}$ 和汞交镉抑制系数 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{\text{Hg}}$ 来表征, 其值由拟合方程的偏微分式获得。

Hg1.25mg kg⁻¹、Cd125.0mg kg⁻¹时二抑制系数值(表8)显示:(1) $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd} < 0$, 而 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ 在零周围摆动, 且 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 的负值远大于 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ 值。表明 Hg、Cd 共存时, 单位 Hg 浓度变化对土壤脲酶活性的抑制作用仍远大于 Cd, 即前述变浓抑制率 Hg \gg Cd 的结论不仅适于单独添加 Hg、Cd, 亦适于 Hg+ Cd 复合作用下的土样;(2) 在相同温度下随尿素浓度增加, $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 的负值增大, $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ 亦有类同趋势, 揭示尿素浓度对 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ 的负值起到增强作用, 与前述 Hg、Cd 的单因素结论相同;(3) 在相同尿素浓度下, 60℃时的 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 负值最大, 这与在 60℃时土壤脲酶活性较高有关。与前述变浓抑制率在 60℃~70℃时最高基本吻合。

表8 不同温度下脲酶活性镉交汞系数 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 和汞交镉系数 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ (h⁻¹)

Table 8 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ and $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ of urease activity under different temperatures

尿素浓度(mol L ⁻¹) Urea concentration	系数 Coefficient	不同温度下脲酶活性汞镉偏浓抑制率 Part inhibition rate of urease activity under different temperatures					
		20℃	30℃	40℃	50℃	60℃	70℃
0.010	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$	-3.654	-6.060	-4.430	-4.190	-5.212	-0.860
	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$	0.000	0.000	0.016	-0.048	0.020	0.050
0.025	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$	-2.616	-7.102	-6.792	-7.150	-9.64	-5.342
	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$	0.020	0.000	-0.030	0.072	0.024	-0.094
0.050	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$	-5.408	-9.098	-10.618	-12.570	-18.468	-15.552
	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$	-0.032	0.000	0.000	-0.050	0.050	-0.044
0.100	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$	-6.226	-10.374	-14.996	-14.072	-28.274	-28.398
	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$	-0.004	-0.028	0.000	0.019	0.119	0.124

表9看出 Hg、Cd 复合作用下 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ 与单独添加 Hg、Cd 的变浓抑制率 $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ 具有类同特征, 表明 Hg+ Cd 处理中 Hg、Cd 对土壤脲酶仍以各自单独抑制效应为主, 但 $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ 的负值呈现略大于 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ 的趋势, 显示其间存在较弱的复合作用, 导致 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ 的负值略有降低。

其他复合重金属浓度处理表现出类似的变化规律, 在此就不予以赘述。

表 9 不同温度下土壤脲酶活性的 $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ 和 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ ($\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$)

Table 9 $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$ of urease activity under different temperatures

重金属 Heavy metal	系数 Coefficient	不同温度下脲酶活性的抑制率 Inhibition rate of urease activity under different temperatures					
		20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
Hg	$\left(\frac{dU}{dC}\right)$	- 5.101	- 12.544	- 16.128	- 13.003	- 28.374	- 38.787
	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd}$	- 6.225	- 10.375	- 14.996	- 16.071	- 28.274	- 28.400
Cd	$\left(\frac{dU}{dC}\right)$	- 0.029	- 0.053	- 0.112	- 0.182	- 0.165	- 0.229
	$\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg}$	- 0.004	- 0.027	0.000	- 0.188	0.117	0.125

注: 尿素浓度为 0.100 mol L^{-1} [Hg^{2+}] 为 1.25 mg kg^{-1} , [Cd^{2+}] 1.25 mg kg^{-1} 时测定结果

3 结 论

由上分析可知:

1. Hg、Cd 对土壤脲酶活性具有明显的抑制作用, 分别以 Hg+ Cd 和 Hg 的抑制幅度和强度最大; Hg 对土壤脲酶活性的毒性最强;
2. 土壤脲酶活性与 Hg 和 Hg+ Cd 浓度呈显著或极显著负相关, 表明其可作为土壤受汞或汞镉复合污染的生态监测指标;
3. 根据脲酶活性的变化, 确定本地区土壤 Hg 和 Cd 严重污染的临界值分别为 $1.613 \sim 2.64 \text{ mg/kg}$ 和 477.78 mg/kg ;
4. 在 Hg、Cd 共存条件下, 脲酶活性不仅受到单因素影响, 而且还存在有微弱的拮抗作用: $-\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Cd} \gg -\left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)_{Hg} \gg 0$, 表明 Hg、Cd 对脲酶活性的抑制仍以单独作用为主;
5. 温度和尿素浓度增加, 会使在单一和复合条件下重金属对土壤脲酶的抑制作用增强。

参 考 文 献

1. 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属. 北京: 中国环境科学出版社, 1995
2. 夏家淇主编. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1996
3. Welp G. Inhibitory effects of the total and water-soluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a heess soil. Biol. Fert. Soils, 1999, 30: 132~ 139
4. 和文祥, 朱铭莪. 陕西主要土壤脲酶活性与土壤肥力关系研究. 土壤学报, 1997, 34(4): 392~ 398
5. 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1987
6. 周礼恺, 张志明, 曹承锦等. 土壤的重金属污染与土壤酶活性. 环境科学学报, 1985, 5(2): 176~ 183
7. 尔·维·加里乌林. 根据土壤酶的活性监测土壤的重金属污染. 国外农业环境保护, 1992, 3: 33~ 36
8. Deng S P, Tabatabai M A. Cellulase activity of soils: effect of trace elements. Soil Biol. Biochem., 1995, 27(7): 977~ 979
9. 南京农学院主编. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1980

10. 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999, 477~ 487
11. 田均良, 彭祥林. 黄土高原土壤地球化学. 北京: 科学出版社, 1994 111~ 114
12. Tabatabai M A. Effect of trace elements on urease activity in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1977, 9: 9~ 13
13. Moyo C C, Kissel D E, Cabrera M L. Temperature effects on soil urease activity. *Soil Biol. Biochem.*; 1989, 21(7): 935~ 938
14. 和文祥, 朱铭莪. 温度和底物浓度对陕西土壤脲酶活性的影响. *西北农业大学学报*, 1998, 26(5): 15~ 19
15. 周启星著. 复合污染生态学. 北京: 中国环境科学出版社, 1995
16. 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. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 338~ 343
17. Kandler E, Kampidler C, Horak O. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. *Biol. Fertil. Soils*, 1996, 23: 299~ 306
18. Doelman P, Haanstra L. Short and long term effects of heavy metals on urease activity in soils. *Biol. Fertil. Soils*, 1986, 2: 213~ 218

EFFECT OF Hg AND Cd ON SOIL UREASE ACTIVITY

He Wen-xiang Huang Ying-feng Zhu Ming-e Zhang Yi-ping

(Department of Resource and Environmental Science, Northwest

Sci-Tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Summary

The study shows that Hg and Cd had a remarkable inhibitory effect on soil urease activity, with Hg+ Cd and Hg being the most in extent and intensity, respectively. Urease activity can be an index of Hg or Hg+ Cd pollution of soil. The soils were polluted severely when the contents of Hg and Cd in the soil reached 1.613~ 2.647mg kg⁻¹ and 481.09mg kg⁻¹ respectively. In the case of Hg+ Cd, the inhibition effect was mainly determined by either of the two elements. Hg and Cd showed weak antagonism in multiple treatments. Temperature and urea concentration could enhance heavy metals' inhibition effect on urease activity.

Key words Soil urease, Mercury, Cadmium