

Hg 的土壤酶效应初步研究

田海霞, 和文祥*, 乔 园, 吕家琰, 韦革宏

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用土壤酶对汞生态毒性进行研究,在理论和实践上具有重要意义。通过室内模拟试验,针对我国几种主要类型土壤(黄褐土、风沙土、壤土和红壤)中影响土壤碳、氮、磷物质循环和微生物活性的土壤转化酶、脲酶、碱性磷酸酶、脱氢酶与 Hg 的关系进行了探讨。结果表明,Hg 抑制土壤碱性磷酸酶、转化酶活性,但规律性不明显;土壤脲酶低浓度时激活,高浓度抑制;土壤脱氢酶和总体酶活性受到抑制。Hg 浓度与脲酶、脱氢酶、总体酶活性间达显著或极显著负相关关系,揭示出其在一定程度上可表征土壤 Hg 污染的程度,其中尤以总体酶活性结果最优;计算 Hg 轻微污染时的 ED_{10} 值 $0.000\ 5\sim 0.59\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤有机质和 pH 对二者关系具有重要影响。

关键词:Hg; 土壤酶; 生态毒理; 总体酶活性; 生态剂量

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)05-0913-07

Impact of Mercury on Soil Enzyme Activity

TIAN Hai-xia, HE Wen-xiang, QIAO Yuan, LÜ Jia-long, WEI Ge-hong

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract:Mercury (Hg) is one of heavy metals which can lead to serious environment pollution. It is of great importance in terms of theory and application to investigate the eco-toxicity of Hg on soil enzyme activity. This article used laboratory simulation methods to explore the relationships between Hg and soil urease, alkaline-phosphatase, invertase, and dehydrogenase which play a significant role in the cycles of carbon, nitrogen, phosphate and microbiological activity using four representative soils including cinnamon, sandy soil, loess soil, red soil. The results showed that Hg could inhibit the activities of soil alkaline-phosphatase and invertase without evident regularity. Hg could substantially inhibit soil urease activity at high concentrations, while slightly increased soil urease at low concentrations. Similarly, Hg could dramatically inhibit soil dehydrogenase activity and the total enzyme index (TEI). Significantly or highly significantly negative correlations existed between Hg and soil urease, dehydrogenase, and TEI. Therefore, they could be used as indicators to evaluate Hg pollution in soils; especially TEI, as an overall index parameter, could be used other than individual indicators. The critical values of ED_{10} for all soils were among $0.000\ 5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.59\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Both soil organic matter and pH affected the value of ED_{10} .

Keywords: Hg; soil enzyme; ecotoxicology; TEI; ecology dose

汞作为土壤重金属污染元素之一,且在生物体中易转化为毒性更大的甲基化合物,会引起诸如水俣病等灾害的发生,被 EPA 列为 129 种优先控制的污染

物之一。据报道目前全球每年人为活动向大气的汞排放量有 2 000 t,其中我国每年排放 500~600 t,占全球汞排放总量的 1/4 以上^[1]。我国土壤中 Hg 含量范围为 $0.001\sim 45.90\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于世界土壤 Hg 自然含量的平均值,特别是在贵州等 Hg 污染严重的地区,土壤含量可达 $29.6\sim 793\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[2]。因此,汞的生态毒理效应研究一直是环境和土壤科学关注的重点,在理论和实践上具有十分重要的意义。

土壤酶作为土壤重要的组成部分,在营养物质转化、能量代谢、污染土壤修复等过程中发挥着重要作

收稿日期:2011-05-06

基金项目:“863”计划项目“农业生境监测检查与修复技术研究”(2012AA100602);农业部公益性行业(农业)科研专项(200903015)

作者简介:田海霞(1984—),女,山西孝义人,硕士,中国科学院生态环境中心在读博士,主要从事土壤生态毒理研究。

E-mail:jingyi_180@163.com

* 通讯作者:和文祥 E-mail:wxhe1968@163.com

用,被称为土壤生态系统的中心^[3]。近 20 年来国内外学者将其应用到土壤污染领域,由于土壤酶测定简便、快捷、准确,而且是土壤污染和性质共同作用的结果,作为监测指标优势明显,相继提出将土壤转化酶、磷酸酶、脱氢酶等作为污染监测指标^[4-7]。由于土壤酶的种类、来源、功能不同,尽管单一酶活性可提供一些重要信息,但无法涵盖全部或整体酶活性的状态,因而利用不同地区土壤酶对重金属的反应并不一致;同时对汞污染的土壤酶效应方面研究报道相对较少,结果也有一定差异,如杨春璐、Oliveira 等^[4,8-10]分别认为脱氢酶、碱性磷酸酶、脲酶可作为土壤汞污染的指标;加之这些文献报道多局限在单一酶活性的研究上,鲜见几个酶类的综合分析。为此,本文以我国几种主要类型土壤为对象,采用室内模拟方法,研究影响 C、N、P 物质循环和微生物活性的土壤转化酶、脲酶、磷酸酶和脱氢酶活性的变化规律,并以这 4 种酶为基础,获得监测土壤汞污染土壤酶学指标,为环境保护和监测等提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

采自陕西省黄龙县的褐土(简育干润淋溶土, Hapli-Ustic Argosols),杨凌区的壤土(土垫旱耕人为土 Eum Orthic Anthrosols),榆林市的风沙土(干旱砂质新成土, Aridi-Sandic Primosols)和江西省鹰潭市的红壤(简育湿润富铁土 Hap Udic Ferrisols)。黄褐土、风沙土、壤土的主要矿物学类型为水云母-蛭石;红壤的为高岭-水云母^[11]。采样时,先去除 0~5 cm 的表土,取 5~20 cm 土样,混匀风干,过 1 mm 筛后备用。常规方法分析^[12]土样的理化性质,结果见表 1。

1.2 试验方案

向 5.00 g 土样中加入 1 mL 甲苯,15 min 后添加 5 mL 不同质量浓度(0、0.25、0.5、1.0、5.0、10.0、20.0 $\text{Hg}^{2+} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 HgCl_2 溶液,混匀 30 min 后加入相应的底物和缓冲液,37 °C 培养,定期(8 h 或 12 h)取样,采用靛酚蓝、磷酸苯二钠、3,5-二硝基水杨酸和三苯基四氮唑氯化物(TTC)比色法分别测定土壤脲酶、碱性磷酸酶、转化酶和脱氢酶活性^[13],其单位分别用 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{ph}(\text{OH})$ 、葡萄糖的量、三苯基甲腈(TPF)的量 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 来表示。每处理重复 3 次,设无底物、无土壤处理作为对照。

1.3 数据分析

采用 Excel 和 DPS7.05 软件对数据进行计算分析。

相对活性=处理的酶活性/对照酶活性 $\times 100\%$

生态剂量(Ecological dose) ED_{10} 和 ED_{50} 分别是指土壤酶活性变化 10% 和 50% 时外界污染物的浓度,可表征土壤轻微和中度污染时的临界浓度^[14]。

总体酶活性参数按下式计算:

$$\text{TEI}(\text{The total enzyme index})^{[15]} = \sum_{i=1}^i X_i / \bar{X}_i$$

其中 X_i 为第 i 种土壤酶活性, $\bar{X}_i$ 为第 i 种酶活性的平均值。

2 结果与讨论

2.1 Hg 对土壤脲酶活性的影响

由表 2 可以看出:

(1)未添加 Hg 时,同一类型土壤的脲酶活性值随有机质含量升高而增加,且与有机质($r=0.72^*$)、全磷($r=0.71^*$)达显著正相关,这主要是由于土壤酶能与有机质等结合,以吸附态存在的缘故^[16]。

表 1 供试土样的理化性质

Table 1 Physic-chemical properties of soils tested

土样 Soil samples	编号 No.	有机质 O M/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 T N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 T P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 Alk-hydrolyzabe N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH(H_2O)
黄褐土 Cinnamon	1	26.07	0.77	1.83	101.93	8.05	8.15
	2	14.59	0.38	0.80	61.33	7.41	8.63
风沙土 Sandy soil	3	19.46	0.51	1.04	101.39	7.27	8.13
	4	17.63	0.31	0.44	60.37	4.49	8.69
	5	0.92	0.02	0.22	5.87	1.63	8.94
壤土 Lou soil	6	23.66	1.78	1.59	141.28	16.91	8.34
红壤 Red soil	7	20.02	1.43	0.66	126.70	14.48	5.48
	8	8.22	0.69	0.45	61.85	6.23	4.03
	9	9.60	0.83	0.34	57.38	13.22	5.00

(2)从不同土壤类型来看,汞对 4 种土壤中脲酶活性的抑制程度不同,这与土壤性质有关。加入相同浓度的 Hg,表现出不同的生态效应与环境效应。如添加 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Hg}^{2+}$ 后,除 5 号和 9 号外,其他土样脲酶活性变化较小,其中 4、6 号和 7 号土样脲酶活性略有增加,增幅分别为 4%、23%和 9%。一般认为土壤有机质含量和 pH 能够对重金属的毒性起缓冲作用,土壤有机质含量高,对酶的保护作用相对较大^[17-18]。其原因是重金属极易与土壤组分(有机、无机颗粒)发生吸附络合、沉淀反应,Hg 进入土壤后 95%以上能迅速被土壤吸持或固定,从而降低 Hg 的生态毒性^[10]。本文中 5 号土壤有机质含量最低,9 号土壤 pH 最小且有机质含量也很少,因此这两种土壤受汞毒害作用最大,在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Hg}^{2+}$ 时脲酶完全被抑制。

(3)随 Hg 质量浓度增加,除 4、6、7 号 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度外,土样脲酶活性受到抑制,且大部分浓度下的酶活性差异达到显著水平。当浓度增大到 $20.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,供试土样脲酶活性降幅达

27%~100%。

(4)当 Hg 质量浓度 $\geq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,红壤脲酶活性降幅远大于其他土壤。这可能是酸性土壤条件下 Hg 毒性较强的缘故,揭示出酸性土壤脲酶比碱性的更敏感。

(5)将 Hg 质量浓度(C)与脲酶活性(U)按 $U=A \times \ln(C)+B$ 模型拟合^[18],结果(表 3)显示除 5、8 号土样外,其余均达显著或极显著负相关,揭示脲酶在一定程度上可表征土壤 Hg 污染程度的大小,这与 Sophie Chaperon 等的结果一致^[19-21]。计算得到土壤 Hg 轻度污染的生态剂量 ED_{10} 值为 $0.13 \sim 0.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 Hg 对土壤碱性磷酸酶活性的影响

表 4 可以看出:

(1)土壤磷酸酶活性与有机质($r=0.77^*$)和全磷($r=0.76^*$)呈显著正相关,佐证了土壤碱性磷酸酶活性可作为土壤肥力的指标^[22]。

(2)总体上 Hg 抑制了土壤碱性磷酸酶活性,如加入 Hg 在 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,4 号土样降幅最小为 1%,5 号

表 2 不同浓度 Hg 对土壤脲酶活性的影响

Table 2 Soil urease activities affected by different concentration Hg

编号 No.	Hg 浓度 Hg Concentration/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$						
	0	0.25	0.5	1.0	5.0	10.0	20.0
1	35.19a	34.77a	30.15b	30.71b	25.11c	24.50d	25.30c
2	7.73a	7.73a	5.35b	4.02c	3.48c	3.33c	3.27c
3	42.10a	40.26a	38.39b	35.00c	32.28d	29.56e	28.91e
4	25.63b	26.71a	22.28c	20.60d	18.98f	19.52e	18.64f
5	0.26a	0.03b	0c	0c	0c	0c	0c
6	12.35b	15.22a	12.69b	8.43c	6.39d	4.92e	4.79f
7	9.79b	10.85a	8.81c	4.37d	2.73e	1.52f	1.44f
8	5.72a	5.73a	1.11b	0.66c	0.66c	0.50d	0.36d
9	1.48a	1.18b	0c	0c	0c	0c	0c

注:同行数据后标不同字母者表明 Duncan's 多重比较差异显著($P<0.05$),下表同。

Note: Different capital letters in the same row mean significant difference at 5% level. The same is as below.

表 3 土壤脲酶活性与 Hg 质量浓度拟合方程

Table 3 Regression equations between soil urease activity and concentration of Hg

编号 No.	拟合方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	$\text{ED}_{10}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
1	$U=-2.19 \times \ln C + 30.19$	-0.935**	0.51
2	$U=-0.86 \times \ln C + 5.22$	-0.862*	0.13
3	$U=-2.62 \times \ln C + 36.18$	-0.988**	0.52
4	$U=-1.5 \times \ln C + 22.33$	-0.867*	0.61
6	$U=-2.35 \times \ln C + 10.63$	-0.953**	0.81
7	$U=-2.14 \times \ln C + 6.67$	-0.942**	0.37

注:自由度 $n-2=4$, $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。下同。

Note: Freedom $n-2=4$, $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$. It is the same with below figures.

土样降幅最大达到 41%。碱性土壤平均降幅为 13%, 而酸性土壤的降幅为 23%。

(3) 随 Hg 浓度增加, 各处理碱性磷酸酶酶活性变化规律不明显, 反映出土壤碱性磷酸酶对 Hg 敏感性较差。杨春璐等^[9]研究表明土壤中中性磷酸酶对汞污染不敏感。而徐冬梅等^[17]认为汞对土壤酸性磷酸酶具有明显的抑制作用, 研究表明其机理为非竞争和反竞争的混合抑制类型, 这与本文结果产生差异的主要原因可能是供试土壤的地区差异所致不同。

2.3 Hg 对土壤转化酶活性的影响

表 5 显示:

(1) 土壤转化酶活性与有机质 ($r=0.76^*$) 和全磷 ($r=0.79^*$) 呈显著正相关。

(2) 在低浓度时各土壤转化酶响应不尽一致。如 Hg 浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 对 2、9 号土样转化酶有轻微的激活作用, 增幅分别达到 15% 和 14%, 其余土样的降幅范围为 9%~33%。

(3) 随 Hg 浓度增加, 土壤转化酶活性变化规律

亦不明显, 如 5 号土样转化酶对汞污染反应比较迟钝, 因为不加污染物时本身转化酶活性很小。和文祥等^[22]研究也得出类似的结论。但有研究表明 Hg 能抑制土壤转化酶活性, 两者之间存在很好的相关性, 即转化酶活性在一定程度上也可表征 Hg 污染状况^[9]。因为 Hg 对转化酶活性的抑制作用主要是由于其与酶活性部位中的巯基和咪唑的配位体等结合并形成稳定的化学键, 从而与底物产生非竞争性抑制作用。土壤转化酶活性对 Hg 污染响应不一致, 其原因可能是供试土壤的地区差异所致, 有待进一步研究。

(4) 将二者关系拟合 (表 6) 后显示, 仅 4 个土样达显著或极显著负相关; 计算获得生态剂量 ED_{10} 的范围为 $0.74 \sim 4.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.4 Hg 对土壤脱氢酶活性的影响

土壤脱氢酶是胞内酶, 只存在于活的微生物细胞内, 能够促进有机物脱氢, 起到传递氢的作用, 其活性大小直接反映土壤微生物的数量和活性, 并可作为土壤重金属污染的指标^[23]。由表 7 可以看出:

表 4 不同浓度 Hg 对碱性磷酸酶活性影响

Table 4 Soil alk-phosphatase activity affected by different concentration Hg

编号 No.	Hg 浓度 Hg concentration/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$						
	0	0.25	0.5	1.0	5.0	10.0	20.0
1	105.51a	90.89d	98.07b	96.89b	92.16c	93.93c	92.83c
2	54.62a	55.72a	52.67b	51.74b	51.24b	50.39c	49.97c
3	99.90a	98.90a	97.00b	89.50e	92.70d	94.70c	90.00e
4	55.50b	52.67d	54.63c	57.32a	54.85b	54.19c	54.48c
5	2.79a	2.59b	2.42c	2.37d	2.17e	1.95f	1.62g
6	50.06b	53.29a	48.99c	49.53bc	49.79c	46.97d	47.78d
7	22.42a	21.47b	19.78d	20.11c	19.08e	19.99cd	19.37e
8	4.21d	4.08e	6.14b	3.96f	6.28a	5.19c	3.24g
9	3.31a	1.45d	1.56c	1.56c	0.86f	1.27e	2.27b

表 5 不同浓度 Hg 对转化酶活性的影响

Table 5 Soil urease invertase activity affected by different concentration Hg

编号 No.	Hg 浓度 Hg concentration/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$						
	0	0.25	0.5	1.0	5.0	10.0	20.0
1	1.00a	0.67b	0.69b	0.61c	0.63c	0.62c	0.64c
2	0.55b	0.63a	0.53b	0.53b	0.48c	0.43d	0.47c
3	1.01a	1.00a	1.01a	0.96b	0.79c	0.72e	0.75d
4	0.44a	0.40b	0.35c	0.36c	0.37c	0.28e	0.33d
5	0.01a	0d	0.01c	0.01d	0.01c	0.01c	0.01b
6	0.54a	0.54a	0.49b	0.45c	0.45c	0.44c	0.41d
7	0.20a	0.16b	0.15b	0.14bc	0.16b	0.13c	0.13c
8	0.12a	0.08b	0.09b	0.09b	0.06d	0.06d	0.07c
9	0.07b	0.08a	0.07b	0.06c	0.06c	0.05d	0.05d

(1)Hg 胁迫下土壤脱氢酶活性随 Hg 浓度增加而减小,各处理的脱氢酶活性均显著低于未添加 Hg 土壤。当浓度增至 $20.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,5、8、9 号土样的脱氢酶活性完全被抑制,其余土样降幅也达到 68%~92%。

(2)从不同土壤类型来看,当汞浓度为 $20.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,碱性土壤降幅为 68%~100%,平均达到 82%;酸性土壤中仅 7 号土样能检测出脱氢酶活性,其降幅为 83%。含有机质较低的 8 号和 9 号酸性土样在 Hg 浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,脱氢酶即完全被抑制。表明在酸性条件下汞的毒性更强。因为在酸性条件下,土壤中的重金属主要以离子态存在;pH 越低土壤中游离出来的重金属数量越大,活性越强,对生物的毒害就越

高;反之亦然^[24]。

(3)Hg 质量浓度(C)与脱氢酶活性(U)拟合结果(表 8)显示,两者关系均达显著或极显著负相关,揭示脱氢酶在一定程度上可表征土壤 Hg 污染程度。

(4)计算的生态剂量值 ED_{10} 为 $0.88\sim 4.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中有机质含量低的土样 ED_{10} 值也较低,将土样有机质含量与其 ED_{50} 值进行相关分析,两者达到极显著正相关($r=0.89^{**}$),表明有机质对 Hg 的污染具有一定缓冲作用。

2.5 Hg 对土壤总体酶活性的影响

土壤的理化性质不同,对酶的保护作用和对外源物质的吸附缓冲能力也有差异,因此二者之间关系随

表 6 土壤转化酶活性与 Hg 质量浓度拟合方程

Table 6 Regression equations between soil invertase activity and concentration of Hg

编号 No.	拟合方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	$ED_{10}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
2	$U=-0.03\times\ln C+0.54$	-0.871*	4.48
3	$U=-0.07\times\ln C+0.92$	-0.958**	1.35
6	$U=-0.02\times\ln C+0.48$	-0.895*	0.74
9	$U=-6.5\times 10^{-3}\times\ln C+0.07$	-0.973**	2.94

表 7 不同浓度 Hg 对土壤脱氢酶活性的影响

Table 7 Soil dehydrogenase activity affected by different concentration Hg

编号 No.	Hg 浓度 Hg concentration/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						
	0	0.25	0.5	1.0	5.0	10.0	20.0
1	2.67a	2.41b	1.96c	1.61d	1.48e	1.10f	0.78g
2	2.38a	2.30b	2.16c	1.74d	0.77e	0.50f	0.40g
3	2.80a	2.67b	2.35c	2.02d	0.86e	0.67f	0.60f
4	1.93a	1.66b	1.24c	0.73d	0.28e	0.21e	0.15f
5	0.07a	0.04b	0.02c	0.01d	0e	0e	0e
6	3.23a	2.73b	2.49c	2.14d	1.37e	1.15f	1.03f
7	1.84a	1.58b	1.78a	1.35c	1.06d	0.36e	0.31e
8	0.99a	0.82b	0.64c	0.38e	0.01e	0e	0e
9	0.74a	0.61b	0.45c	0.36d	0e	0e	0e

表 8 土壤脱氢酶活性与 Hg 质量浓度的拟合方程

Table 8 Regression equations between soil dehydrogenase activity and concentration of Hg

编号 No.	拟合方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	$ED_{10}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	$U=-0.32\times\ln C+1.82$	-0.968**	0.16
2	$U=-0.48\times\ln C+1.70$	-0.990*	0.39
3	$U=-0.52\times\ln C+1.95$	-0.986**	0.33
4	$U=-0.34\times\ln C+0.98$	-0.957**	0.11
5	$U=-0.001\times\ln C+0.02$	-0.930**	0.004
6	$U=-0.41\times\ln C+2.12$	-0.994**	0.16
7	$U=-0.34\times\ln C+1.34$	-0.946**	0.39
8	$U=-0.20\times\ln C+0.47$	-0.959**	0.12
9	$U=-0.15\times\ln C+0.36$	-0.964**	0.13

土壤不同也必然存在差异。由前面分析可知,土壤脲酶、碱性磷酸酶、转化酶、脱氢酶对 Hg 毒性的响应有明显差别,因而很难选择哪个酶作为指标会更好,为此计算了土壤总体酶活性参数。结果(表 9)显示:

- (1)Hg 加入后,土壤总体酶活性呈现抑制作用。
- (2)随 Hg 浓度的增加,总体酶活性值持续减小,当 Hg 质量浓度为 20 mg·kg⁻¹ 时,土壤总体酶活性降幅为 32%~84%;而且有机质含量最高的 1 号土样降幅最小,揭示了有机质对 Hg 的污染有缓冲作用。

(3)Hg 质量浓度(*C*)与总体酶活性(*U*)拟合结果(表 10)显示,两者关系达极显著负相关,表明总体酶活性可较好表征土壤汞污染的程度;计算得到 Hg 污染的生态剂量值 ED₁₀ 为 0.000 5~0.59 mg·kg⁻¹。

3 结论

综上所述,通过 Hg 的土壤酶效应研究表明:Hg 抑制了土壤碱性磷酸酶、转化酶活性,但是规律性不明显;低浓度 Hg 激活了土壤脲酶活性,高浓度时则相反;土壤脱氢酶和总体酶活性受到了 Hg 的抑制,

其间关系达到了极显著负相关,揭示出脲酶、脱氢酶和总体酶活性在一定程度上可表征土壤 Hg 污染程度的大小;根据剂量越小,反应越敏感的原则,计算得到供试土样 Hg 污染的生态剂量值 ED₁₀ 为 0.000 5~0.59 mg·kg⁻¹,酸性土壤和有机质含量低的土壤对 Hg 较敏感;土壤有机质和 pH 对土壤酶与汞的关系有重要影响。

参考文献:

[1] 李 静,梁嘉琳.我国汞污染防治面临巨大挑战[N].经济参考报,2011-10-24(7).
LI Jing, LIANG Jia-lin. In China's mercury pollution prevention is confronted with great challenge [N]. *Economic Information*, 2011-10-24 (7).
[2] 杨燕娜,温小乐.土壤汞污染及其治理措施的研究综述[J].能源与环境,2006,24(3):9-11.
YANG Yan-na, WEN Xiao-le. The review about soil Hg pollution and control measures[J]. *Energy and Environment*, 2006, 24(3):9-11.
[3] Tabatabai M A, Dick W A. Enzymes in soil: Research and developments in measuring activities//Burns R G, Dick R P. (Eds.), *Enzymes in the Environment. Activity, Ecology, and Applications*[M]. New York: Marcel

表 9 Hg 对土样总体酶活性的影响
Table 9 Effect of Hg on soil total enzyme activity

编号 No.	Hg 浓度 Hg concentration/mg·kg ⁻¹						
	0	0.25	0.5	1.0	5.0	10.0	20.0
1	10.06	9.14	8.57	8.04	7.40	7.01	6.81
2	5.68	5.85	5.12	4.65	3.56	3.14	3.14
3	11.27	10.94	10.47	9.57	7.88	7.33	7.18
4	6.46	6.12	5.27	4.75	4.17	3.88	3.90
5	0.18	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07
6	6.71	6.56	5.89	5.11	4.24	3.82	3.63
7	3.60	3.32	3.27	2.48	2.11	1.30	1.23
8	1.82	1.55	1.08	0.75	0.38	0.33	0.30
9	1.08	0.92	0.65	0.54	0.19	0.17	0.19

表 10 土壤总体酶活性与 Hg 质量浓度的拟合方程
Table 10 Regression equations between soil total enzyme activity and concentration of Hg

编号 No.	拟合方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	ED ₁₀ /mg·kg ⁻¹
1	$U=-0.52\times\ln C+8.25$	-0.989**	0.07
2	$U=-0.64\times\ln C+4.75$	-0.984**	0.57
3	$U=-0.93\times\ln C+9.65$	-0.990**	0.59
4	$U=-0.48\times\ln C+5.07$	-0.953**	0.21
5	$U=-0.009\times\ln C+0.094$	-0.983**	0.000 5
6	$U=-0.66\times\ln C+5.41$	-0.985**	0.39
7	$U=-0.51\times\ln C+2.69$	-0.975**	0.34
8	$U=-0.27\times\ln C+0.95$	-0.943**	0.08
9	$U=-0.17\times\ln C+0.58$	-0.952**	0.10

- Dekker, Inc., 2002:567-595.
- [4] 杨春璐, 孙铁珩, 和文祥, 等. 汞对土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3):620-624.
- YANG Chun-lu, SUN Tie-heng, HE Wen-xiang, et al. Effects of Hg on soil enzyme activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3):620-624.
- [5] 卢显芝, 金建华, 郝建朝, 等. 不同土层土壤酶活性对重金属汞和镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8):1844-1848.
- LU Xian-zhi, JIN Jian-hua, HAO Jian-chao, et al. Response of soil enzyme activities in different soil layers to single and combined stress of Hg and Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8):1844-1848.
- [6] Kizilkaya R, Askin T, Bayrakli B, et al. Microbiological characteristics of soils contaminated with heavy metals[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2004, 40(2):95-102.
- [7] Olga M. Effects of heavy metals on some soil biological parameters[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1-3):220-223.
- [8] Oliveira A, Pampulha M E. Effects of long-term heavy metal contamination on soil microbial characteristics[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006, 102(3):157-161.
- [9] Cristiano Casucci, Benedict C Okeke, William T Frankenberger. Effects of mercury on microbial biomass and enzyme activities in soil [J]. *Biological Trace Element Research*, 2003, 94(2):179-191.
- [10] YANG Chunlu, SUN Tieheng, HE Wenxiang, et al. Single and joint effects of pesticides and mercury on soil urease [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(2):210-216.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤[M]. 北京:科学出版社, 1978.
- Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. China soils[M]. Beijing:Science Press, 1978.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:33-115.
- BAO Shi-dan. Agricultural chemistry analysis for soil[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000:33-115.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:中国农业出版社, 1986:14-340.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing:China Agriculture Press, 1986:14-340.
- [14] Doelman P, Haanstra L. Short- and long-term effects of heavy metals on phosphatase activity in soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 8(3):235-241.
- [15] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6):1232-1236.
- HE Wen-xiang, TAN Xiang-ping, WANG Xu-dong, et al. Study on total enzyme activity index in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6):1232-1236.
- [16] Burns R G. Soil enzymes[M]. New York London:Academic Press, 1978:58-59.
- [17] 徐冬梅, 刘广深, 王黎明, 等. 重金属汞对土壤酸性磷酸酶的影响及其机理[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5):865-870.
- XU Dong-mei, LIU Guang-shen, WANG Li-ming, et al. Studies on the effects and corresponding mechanism of Hg^{2+} on the activity of soil acid phosphatase[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5):865-870.
- [18] 朱小翠, 青长乐, 皮广洁. 土壤汞形态及其影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1):94-100.
- ZHU Xiao-cui, QING Chang-le, PI Guang-jie. Study on soil mercury fractions and their influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1):94-100.
- [19] 周礼恺, 张志明, 曹承绵, 等. 土壤的重金属污染与土壤酶活性[J]. 环境科学学报, 1985, 5(2):176-183.
- ZHOU Li-kai, ZHANG Zhi-ming, CAO Cheng-mian, et al. Heavy metal pollution and enzymatic activity of soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1985, 5(2):176-183.
- [20] 和文祥, 黄英锋, 朱铭莪, 等. 汞和镉对土壤脲酶活性影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(3):412-420.
- HE Wen-xiang, HUANG Ying-feng, ZHU Ming-e, et al. Effect of Hg and Cd on soil urease activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3):412-420.
- [21] Sophie Chaperona, Sébastien Sauvé. Toxicity interaction of metals (Ag, Cu, Hg, Zn) to urease and dehydrogenase activities in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9):2329-2338.
- [22] 和文祥, 王娟, 高亚军, 等. 不同价态铬的土壤碱性磷酸酶效应模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):104-109.
- HE Wen-xiang, WANG Juan, GAO Ya-jun, et al. Effect of different valences chromium on soil alk-phosphatase characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):104-109.
- [23] 和文祥, 韦革宏, 武永军, 等. 汞对土壤酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3):279-283.
- HE Wen-xiang, WEI Ge-hong, WU Yong-jun, et al. Soil enzyme activity effected by Hg[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(3):279-283.
- [24] Brookes P C, Mc Grath S P. Effect of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass[J]. *J Soil Sci*, 1984, 35:341-346.
- [25] 和文祥, 朱铭莪, 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.