

pH对汞镉与土壤脲酶活性关系的影响*

和文祥, 朱铭莪, 张一平

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘要] 以壤土为供试土壤, 设置不同pH及汞、镉浓度处理, 研究pH对汞镉与土壤脲酶活性关系的影响。结果表明: 在供试pH范围内, 脲酶活性在pH 5.5~6.0 和 8.0~9.0 时最大; 汞镉加入几乎没有改变土壤脲酶最适pH; 重金属生态毒性呈现 $Hg > Cd$ 的规律性变化。统计分析表明, 土壤脲酶活性、最大反应速度和反应速度常数均可在一定程度上表征土壤汞镉污染的程度; 随重金属浓度增加, 土壤脲酶 K_m 基本不变, V_{max} 降低, 表明土壤脲酶受汞镉作用机理主要为非竞争性抑制; 在较宽pH范围内, 土壤严重污染的临界汞、镉浓度分别为 2.098 和 302.83 mg/kg。

[关键词] 土壤脲酶; pH; 汞; 镉

[中图分类号] S154.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-2782(2002)03-0066-05

重金属随三废物质进入土壤, 其中汞和镉尤具有易累积、难排除的特性^[1], 对土壤质量有严重影响^[2]。土壤酶是土壤营养物质循环和能量代谢的主要参与者, 也是维持土壤质量的作用者。近年来一些学者^[3~7]将土壤酶应用到土壤重金属的生态毒理研究中, 先后提出脲酶、转化酶、磷酸酶等监测指标, 但结果随土壤类型及性质等的不同而发生较大变化。同时我国地域辽阔, 耕作土壤的pH范围较广(大多数pH在5.5~8.5), 尽管已有pH对土壤酶活性和汞镉毒性作用等的研究^[8], 但有关pH对二者关系影响鲜见报道。本研究通过不同pH条件下汞镉对脲酶活性参数影响的研究, 探讨pH对汞镉与土壤脲酶活性的作用规律, 以期为农业可持续发展和环境保护监测提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土壤为采自西北农林科技大学试验地的壤土, 采样方法为去除0~5 cm表层, 五点法采集5~20 cm耕层土样, 风干过1 mm尼龙筛后保存备用。

用常规方法^[9]测定土壤基本理化性质: 有机质17.65 g/kg, 全氮1.502 g/kg, 全磷1.625 g/kg, 碱解氮137.592 mg/kg, 速效磷345.52 mg/kg; Hg 0.074 mg/kg(冷原子荧光测汞仪法), Cd

0.348 mg/kg, Cr 62.5 mg/kg, Pb 22.30 mg/kg(原子分光光度计法)。

1.2 试验方法

向5.00 g土样中加入1 mL甲苯, 15 min后添加5 mL重金属溶液(表1)混匀, 30 min^[10]后, 加入10 mL不同浓度的尿素溶液和20 mL不同pH(5.5, 6.0, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0)的磷酸盐缓冲液, 50 °C条件下恒温培养, 定时取样用靛酚蓝比色法^[11]测定脲酶活性, 单位以形成NH₃-N的量表示, 即 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。每处理重复3次, 并设无底物(尿素)和无土壤处理为对照。

表1 供试重金属浓度

Table 1 Concentration of heavy metals tested

| Hg(HgCl ₂ , AR) | Cd(CdSO ₄ , AR) | Hg+ Cd |
|----------------------------|----------------------------|---------|
| 0.3125 | 25.00 | 25.3125 |
| 0.625 | 62.50 | 63.125 |
| 1.250 | 125.00 | 126.25 |
| 2.500 | 187.50 | 190.00 |

1.3 数据处理

1.3.1 土壤酶动力学参数 K_m 和 V_{max}

$$\frac{1}{t} \ln \frac{[S_0]}{[S]} = -\frac{1}{K_m} \times \frac{([S_0] - [S])}{t} + \frac{V_{max}}{K_m},$$

其中, t 为酶促反应时间, $[S_0]$ 和 $[S]$ 为初始和 t 时间时的尿素浓度。

将不同时间的 $\frac{1}{t} \ln \frac{[S_0]}{[S]}$ 和 $\frac{1}{t} ([S_0] - [S])$ 值进

* [收稿日期] 2001-07-06

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(39370148)

[作者简介] 和文祥(1968-), 男, 陕西黄龙人, 副教授, 博士, 主要从事土壤生物化学及生态毒理研究。

行线性拟合, 即可求得 K_m 和 V_{max} 值。

1.3.2 土壤酶促反应速度常数 k

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{V_a}{V_a - V_t},$$

其中, V_a 、 V_t 分别为最大和 t 时间的放氨量。

2 结果与讨论

2.1 pH 对土壤脲酶活性的影响

许多学者^[12, 13]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 50℃ 时的变化规律相同^[14], 只是幅度较小, 为了更清楚地了解土壤脲酶活性受汞镉的影响情况, 本研究主要以 50℃ 为例对其关系进行了探讨。测定结果(表 2)表明, 在供试 pH 范围内, 当 pH 值由 5.5 增加至 7.0 时, 对照处理的脲酶活性从 28.08 μg/(g·h) 逐渐降低到 17.06 μg/(g·h), pH

7.0 时达到最低值, 随后土壤脲酶活性急剧增加, 揭示出土壤脲酶酶促反应具有两个最适 pH 范围: pH 5.5~6.0 和 8.0~9.0。这是因为酶是由许多氨基酸组成的一个中性蛋白质, 每种氨基酸至少含有一个羧基和一个氨基, 且都有其特征等电点(pK)值, 即有 2 个等电点; 在不同 pH 条件下酶蛋白活性中心的酸性和碱性基团的离子化和去离子化状态有所差异, 尽管二者是可逆反应, 但只有当酶活性中心处于合适的离子化状态时, 土壤酶才表现出最大活性, 最终导致了脲酶有两个最适 pH 范围。这与 Bremner 等^[10]得到的最适 pH (6.5~7.0 和 8.8~9.0) 较为接近, 但与 Frankenberger 等^[8]提出的 pH 6.0~9.0 相差较远, 主要是由于土壤类型性质及所用缓冲液不同所致。

其他尿素浓度下土壤脲酶活性的变化规律与 0.100 mol/L 时基本相似。

表 2 不同 pH 条件下土壤脲酶活性

Table 2 Soil urease activity under different pH

| Hg/ (mg·kg ⁻¹) | Cd/ (mg·kg ⁻¹) | pH | | | | | | | | μg/(g·h) |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | |
| 0.00 | 0.00 | 28.08 | 27.84 | 17.93 | 17.06 | 23.50 | 33.91 | 26.14 | 30.02 | |
| 0.3125 | 0.00 | 23.76 | 18.91 | 13.82 | 14.90 | 16.20 | 22.68 | 22.03 | 25.06 | |
| 0.625 | 0.00 | 19.44 | 13.61 | 11.45 | 11.23 | 13.61 | 20.52 | 13.82 | 15.77 | |
| 1.25 | 0.00 | 14.04 | 12.53 | 9.07 | 9.50 | 11.02 | 7.13 | 7.99 | 9.29 | |
| 2.50 | 0.00 | 4.10 | 3.46 | 5.18 | 5.40 | 6.26 | 4.54 | 4.54 | 9.07 | |
| 0.00 | 25.0 | 23.54 | 16.63 | 16.20 | 16.63 | 19.66 | 28.94 | 26.78 | 25.70 | |
| 0.00 | 62.5 | 22.01 | 14.69 | 15.77 | 16.85 | 18.14 | 27.43 | 25.70 | 24.62 | |
| 0.00 | 125.0 | 22.25 | 13.18 | 15.34 | 15.76 | 17.50 | 23.98 | 22.46 | 19.44 | |
| 0.00 | 187.5 | 21.60 | 17.50 | 15.77 | 16.20 | 15.55 | 23.11 | 19.22 | 19.66 | |
| 0.3125 | 25.0 | 24.84 | 13.82 | 14.69 | 18.79 | 14.75 | 38.02 | 27.48 | 22.46 | |
| 0.625 | 62.5 | 16.63 | 9.29 | 9.07 | 12.31 | 13.01 | 23.98 | 19.44 | 12.49 | |
| 1.25 | 125.0 | 6.26 | 6.26 | 7.13 | 8.42 | 11.66 | 14.04 | 7.34 | 9.50 | |
| 2.50 | 187.5 | 4.97 | 3.46 | 3.89 | 3.02 | 4.32 | 3.024 | 3.67 | 5.83 | |

注: 尿素浓度为 0.100 mol/L 时测定的脲酶活性。

Note: Soil urease activity was determined at 0.100 mol/L urea concentration.

2.2 pH 对汞镉与土壤脲酶活性关系的影响

表 2 显示, 加入汞镉后脲酶酶促反应的最适 pH 几乎没有发生漂移; 在供试 pH 范围内, 除少数处理外, 脲酶活性总体呈现出 $Hg + Cd < Hg < Cd < CK$ 的规律性变化, 表明汞镉共存时对脲酶的抑制作用最强, 而镉与汞、汞镉相比抑制作用较弱, 这主要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]。

土壤脲酶活性(U)随汞镉浓度(C)增加而减小, 为此对二者关系进行线性拟合($U = \beta_0 + \beta_1 \times C$), 可获得土壤脲酶活性的抑制变化率($\frac{dU}{dC} = \beta_1$)和生态剂量 ED_{50} 值^[13] (Ecological dose values, 当酶活性降

低 50% 时所需添加的重金属量), 结果(表 3)显示: (1)在供试 pH 范围内, 除部分镉处理外其余的脲酶活性与重金属浓度呈显著或极显著负相关, 表明此线性拟合是可行的, 脲酶活性变化可表征土壤汞和 $Hg + Cd$ 污染的程度; (2)土壤脲酶活性的抑制变化率 $-\left(\frac{dU}{dC_{Hg}}\right) \gg -\left(\frac{dU}{dC_{(Hg+ Cd)}}\right) > -\left(\frac{dU}{dC_{Cd}}\right)$, 反映出 Hg 的生态毒性远大于镉; (3)除镉处理外, $-\left(\frac{dU}{dC_{Hg}}\right)$ 和 $-\left(\frac{dU}{dC_{(Hg+ Cd)}}\right)$ 值在 pH 5.5~6.0 和 8.0~9.0 时较大, 这主要是脲酶活性较高的缘故; (4)在供试条件下土壤脲酶的 ED_{50} 值 $Hg < Cd$, 佐证了前述汞的生态毒性远大于镉的结论; (5)汞的 ED_{50} 在 pH 7.0 时达到最大并呈钟形变化, 反映出 pH 7.0 时汞对脲酶活性的毒性相对较弱; (6)土壤

脲酶活性汞镉的 ED_{50} 平均值分别为 2 098 和 302.83 mg/kg, 这可作为确定土壤重金属污染程度的参考依据。

不同 pH 下脲酶活性受汞镉抑制作用有明显差别, pH 6.0 时汞镉对土壤脲酶活性抑制幅度最大, pH 7.5 时则相反。正如许嘉琳等^[2]指出的土壤中重

金属如 Cd^{2+} 等的溶解度与土壤溶液 pH 密切相关, pH 越低, 重金属溶解度越大, 生态毒性越强; 而在碱性条件下多数是以沉淀形式存在, 生态毒性减弱; 同时 pH 对脲酶的巯基、氨基、羧基等组成成分所处状态及蛋白质构型(三级结构)的影响也会改变酶活性。

表 3 土壤脲酶活性的抑制变化率 $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ 和生态剂量 (ED_{50})
Table 3 Inhibited variable $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ and ecological dose of soil urease activity (ED_{50})

| 重金属 Heavy metal | 系数 Coefficient | pH | | | | | | | | 平均值 Average value |
|--------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|
| | | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | |
| Hg | $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ | 9.31 | 8.41 | 2.89 | 2.79 | 3.70 | 7.39 | 5.28 | 8.10 | 2.098 |
| | ED_{50} | 1.43 | 1.38 | 2.74 | 2.84 | 2.65 | 2.01 | 2.16 | 1.57 | |
| Cd | r | -0.992 | -0.928 | -0.952 | -0.963 | -0.916 | -0.904 | -0.914 | -0.850 | 302.83 |
| | $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ | - | - | - | - | 0.0352 | 0.0524 | 0.042 | 0.054 | |
| $Hg + Cd$ | ED_{50} | - | - | - | - | 308.36 | 302.26 | 339.31 | 261.39 | 108.50 |
| | r | -0.742 | -0.524 | -0.698 | -0.775 | -0.901 | -0.925 | -0.965 | -0.926 | |
| $Hg + Cd$ | $\left(\frac{dU}{dC}\right)$ | 0.131 | 0.106 | 0.070 | 0.081 | 0.082 | 0.181 | 0.136 | 0.119 | 108.50 |
| | ED_{50} | 102.3 | 100.8 | 115.4 | 114.1 | 122.72 | 102.99 | 102.17 | 108.2 | |
| $Hg + Cd$ | r | -0.962 | -0.853 | -0.955 | -0.973 | -0.919 | -0.973 | -0.972 | -0.921 | 108.50 |

注: 自由度为 $n - 2 = 3$, $r_{0.05} = 0.878$, $r_{0.01} = 0.959$ 。表 7 同。

Note: df is $n - 2 = 3$, $r_{0.05} = 0.878$, $r_{0.01} = 0.959$. Table 7 is the same.

2.3 pH 对土壤脲酶动力学特征的影响

动力学是研究酶促反应过程的有效手段^[11, 15], 由表 4 可以看出: (1) 土壤脲酶 K_m 基本处于同一数量级, 这可能是其来源较为单一(主要是微生物), 存在状态一致的缘故; (2) 随 pH 增加, 脲酶 K_m 变化的

规律性不明显, 表明总体上 pH 对酶与底物亲合力影响较小; (3) 随汞镉浓度的增加, 汞处理样品在 pH 6.5~7.5 时脲酶 K_m 增加, 镉处理基本不变, 汞镉处理除 pH 7.5 时降低外, 其余均增加, 表明汞镉的加入导致酶与底物亲和力减弱。

表 4 不同 pH 条件下土壤脲酶 K_m 值

Table 4 Soil urease Michaelis constant K_m under different pH

mmol/L

| Hg/ (mg · kg ⁻¹) | Cd/ (mg · kg ⁻¹) | pH | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--|
| | | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | |
| 0.00 | 0.00 | 1.603 | 7.466 | 2.009 | 1.911 | 1.531 | - | 2.304 | 3.368 | |
| 0.3125 | 0.00 | 1.495 | - | 1.624 | 1.906 | 1.828 | - | 3.079 | 3.638 | |
| 0.625 | 0.00 | 3.791 | - | 2.381 | 1.904 | 2.500 | 14.904 | 2.211 | 2.945 | |
| 1.25 | 0.00 | 2.257 | - | 3.573 | 3.409 | 3.544 | 3.820 | 2.910 | 2.875 | |
| 2.50 | 0.00 | 3.689 | 4.831 | - | 8.106 | 6.187 | - | 3.167 | 6.831 | |
| 0.00 | 25.0 | 1.907 | 6.022 | 1.926 | 1.457 | 1.953 | 2.288 | 2.733 | 3.955 | |
| 0.00 | 62.5 | 1.787 | 8.062 | 1.846 | 2.047 | 1.835 | 3.088 | 2.704 | 3.926 | |
| 0.00 | 125.0 | 2.047 | 9.418 | 1.237 | 1.746 | 1.713 | 2.301 | 2.087 | 2.450 | |
| 0.00 | 187.5 | 1.889 | 4.446 | 1.981 | 2.004 | 1.472 | 2.125 | 1.760 | 3.153 | |
| 0.3125 | 25.0 | 1.553 | 2.517 | 2.469 | 2.761 | 4.246 | 6.640 | 6.029 | 3.715 | |
| 0.625 | 62.5 | 2.594 | 2.643 | 2.355 | 2.511 | 3.103 | 7.136 | 5.572 | 2.332 | |
| 1.25 | 125.0 | 3.645 | 3.016 | 3.167 | 3.380 | 2.980 | 8.983 | 6.670 | 6.329 | |
| 2.50 | 187.5 | 5.989 | 4.628 | 3.346 | 4.326 | 2.953 | 4.229 | 3.245 | 4.294 | |

土壤脲酶酶促反应的最大反应速度 V_{max} 可表征土壤中具有活性酶的数量及酶—底物中间络合物解离成酶和产物的速度。表 5 显示: (1) 对照处理脲酶 V_{max} 值在 pH 5.5~6.0 和 8.0~9.0 时较高, 而在

pH 6.5~7.5 时变化较小, 与本研究得到的脲酶最适 pH 是一致的; (2) 汞镉加入导致土壤脲酶 V_{max} 降低, 反映出汞镉抑制了酶—底物活化络合物的解离速度; (3) 随汞镉浓度增加, 土壤脲酶 V_{max} 降低, 相关

分析(表7)显示, V_{max} 与汞和汞镉呈显著或极显著负相关,而与镉只有部分呈显著负相关,说明在此供试土壤上脲酶 V_{max} 可作为土壤受汞或汞镉复合污染的监测指标之一;(4)在供试pH范围内,随汞镉浓度

的增加,土壤脲酶活性的 K_m 值变化较小,而 V_{max} 急剧减小,表明汞镉对土壤脲酶活性的作用机理主要是非竞争性抑制。

表5 不同pH条件下土壤脲酶 V_{max} 值Table 5 Soil urease maximum reactive velocity V_{max} under different pH mmol/(L·g·h)

| Hg/ (mg·kg ⁻¹) | Cd/ (mg·kg ⁻¹) | pH | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | |
| 0.00 | 0.00 | 0.132 | 0.223 | 0.082 | 0.083 | 0.081 | 0.167 | 0.124 | 0.143 |
| 0.3125 | 0.00 | 0.110 | 0.140 | 0.062 | 0.072 | 0.076 | 0.170 | 0.107 | 0.123 |
| 0.625 | 0.00 | 0.104 | 0.070 | 0.050 | 0.053 | 0.067 | 0.124 | 0.066 | 0.074 |
| 1.25 | 0.00 | 0.070 | 0.054 | 0.046 | 0.040 | 0.058 | 0.034 | 0.038 | 0.044 |
| 2.50 | 0.00 | 0.019 | 0.018 | 0.029 | 0.029 | 0.034 | 0.021 | 0.023 | 0.033 |
| 0.00 | 25.0 | 0.112 | 0.091 | 0.078 | 0.079 | 0.089 | 0.137 | 0.131 | 0.131 |
| 0.00 | 62.5 | 0.105 | 0.087 | 0.075 | 0.078 | 0.087 | 0.131 | 0.122 | 0.121 |
| 0.00 | 125.0 | 0.101 | 0.065 | 0.070 | 0.074 | 0.081 | 0.114 | 0.105 | 0.095 |
| 0.00 | 187.5 | 0.096 | 0.067 | 0.074 | 0.072 | 0.074 | 0.108 | 0.092 | 0.092 |
| 0.3125 | 25.0 | 0.114 | 0.067 | 0.069 | 0.082 | 0.073 | 0.154 | 0.115 | 0.110 |
| 0.625 | 62.5 | 0.080 | 0.044 | 0.043 | 0.060 | 0.067 | 0.131 | 0.103 | 0.057 |
| 1.25 | 125.0 | 0.031 | 0.029 | 0.031 | 0.039 | 0.056 | 0.060 | 0.038 | 0.046 |
| 2.50 | 187.5 | 0.025 | 0.017 | 0.018 | 0.014 | 0.021 | 0.023 | 0.018 | 0.027 |

土壤脲酶反应速度常数 k 是指各反应物浓度等于1时的反应速度,与底物浓度无关,其值决定一个反应在本质上是“快”还是“慢”。表6显示,其变化规律与土壤脲酶活性、最大反应速度 V_{max} 等一致,表明pH 5.5~6.0和8.0~9.0时,尽管酶与底物的亲合

力较小(K_m 较大),但由于土壤脲酶酶促反应速度常数较高,酶与底物中间络合物解离速度较快,最终导致土壤脲酶活性较高。此外相关分析(表7)显示, k 与汞及汞镉浓度呈显著或极显著负相关,揭示出汞镉在本质上降低了酶促反应的速率。

表6 土壤脲酶的反应速度常数 k Table 6 Soil urease reactive velocity constant k under different pH ($\times 10^{-3} \cdot h^{-1}$)

| Hg/ (mg·kg ⁻¹) | Cd/ (mg·kg ⁻¹) | pH | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | |
| 0.00 | 0.00 | 15.72 | 20.64 | 8.895 | 9.14 | 9.22 | 10.96 | 12.68 | 12.78 |
| 0.3125 | 0.00 | 13.24 | 18.49 | 7.82 | 7.71 | 8.18 | 11.15 | 9.91 | 10.77 |
| 0.625 | 0.00 | 9.67 | 12.33 | 5.37 | 5.73 | 6.91 | 10.21 | 6.92 | 6.84 |
| 1.25 | 0.00 | 7.46 | 9.44 | 4.26 | 3.74 | 5.35 | 5.68 | 3.55 | 4.34 |
| 2.50 | 0.00 | 1.71 | 1.45 | 1.52 | 1.82 | 2.45 | 2.88 | 2.06 | 3.65 |
| 0.00 | 25.0 | 12.13 | 6.26 | 8.56 | 9.27 | 9.55 | 14.14 | 12.58 | 10.84 |
| 0.00 | 62.5 | 11.59 | 5.47 | 8.17 | 8.30 | 9.41 | 12.09 | 11.81 | 10.09 |
| 0.00 | 125.0 | 10.73 | 5.40 | 8.48 | 8.19 | 8.97 | 11.58 | 11.01 | 9.39 |
| 0.00 | 187.5 | 10.45 | 6.00 | 7.98 | 7.83 | 8.57 | 11.27 | 10.11 | 8.34 |
| 0.3125 | 25.0 | 13.82 | 7.02 | 6.98 | 9.03 | 10.85 | 13.58 | 12.90 | 9.85 |
| 0.625 | 62.5 | 8.17 | 4.39 | 4.31 | 5.99 | 8.16 | 8.23 | 7.38 | 5.83 |
| 1.25 | 125.0 | 2.89 | 2.76 | 2.96 | 3.61 | 5.34 | 4.23 | 2.50 | 3.15 |
| 2.50 | 187.5 | 1.89 | 1.34 | 1.17 | 1.12 | 1.92 | 1.88 | 1.72 | 2.21 |

表7 土壤脲酶 V_{max} 和 k 与重金属的相关系数Table 7 Correlation coefficient between soil urease V_{max} , k and heavy metals

| 脲酶参数 U rease parameter | 重金属 Heavy metal | pH | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | |
| V_{max} | Hg | -0.997 | -0.851 | -0.919 | -0.928 | -0.998 | -0.912 | -0.910 | -0.885 |
| | Cd | -0.862 | -0.706 | -0.771 | -0.969 | -0.720 | -0.911 | -0.955 | -0.968 |
| | Hg+ Cd | -0.964 | -0.744 | -0.961 | -0.993 | -0.964 | -0.992 | -0.978 | -0.917 |
| k | Hg | -0.981 | -0.978 | -0.968 | -0.959 | -0.994 | -0.966 | -0.918 | -0.875 |
| | Cd | -0.806 | -0.592 | -0.792 | -0.918 | -0.867 | -0.346 | -0.996 | -0.934 |
| | Hg+ Cd | -0.959 | -0.776 | -0.965 | -0.989 | -0.958 | -0.942 | -0.952 | -0.939 |

3 结语

(1) 在供试 pH 范围内, 土壤脲酶酶促反应的最适 pH 为 5.5~6.0 和 8.0~9.0, 除 pH 6.0 时镉处理外, 重金属对脲酶的最适 pH 影响较小; (2) 在供试 pH 范围内, 脲酶活性总体呈现 $Hg > Cd > Hg + Cd$ 的规律性变化, 单位重金属汞的生态毒性远大于镉; (3) 土壤脲酶活性、 V_{max} 和 k 与土壤添加汞镉的浓度呈显著或极显著负相关, 表明其可作为土壤汞镉污染程度的监测指标之一; (4) 梅镉的加入导致土壤脲酶 K_m 变化较小, V_{max} 和 k 降低, 揭示出汞镉对脲酶的作用机理主要是非竞争性抑制。

[参考文献]

- [1] 买永彬, 顾方乔, 陶战著. 农业环境学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994. 72- 76.
- [2] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [3] Chander K, Brookes P C. Is the dehydrogenase assay invalid as a method to estimate microbial activity in copper contaminated soil[J]. Soil Biol & Biochem, 1991, 23(10): 909- 915.
- [4] Perez M M, Gonzalez C S. Influence of heavy metals on soil oxidoreductase[J]. Biological Agriculture and Horticulture, 1988, 5(2): 135- 142.
- [5] 尔·维·加里乌林. 根据土壤酶的活性监测土壤的重金属污染[J]. 国外农业环境保护, 1992, 3: 33- 36.
- [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[J]. 环境科学学报, 1985, 5(2): 176- 183.
- [7] 和文祥, 陈会明, 冯贵颖, 等. 梅镉砷元素污染的土壤酶监测研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 338- 343.
- [8] Frankenberger W T J R, Johanson J B. Effect of pH on enzyme stability in soils[J]. Soil Biol & Biochem, 1982, 14: 433- 437.
- [9] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [10] Brenner J M, Douglas L A. Inhibition of urease activity in soils[J]. Soil Biol & Biochem, 1971, 3: 297- 307.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [12] 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[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(5): 15- 19.
- [13] Moyo C C, Kissel D E, Cabrera M L. Temperature effects in soil urease activity[J]. Soil Biol & Biochem, 1989, 21: 935- 938.
- [14] Doelman P, Haanstra L. Short and long term effects of heavy metals on urease activity in soils[J]. Biol Fertil Soils, 1986, 2: 213- 218.
- [15] 和文祥, 朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系研究 II. 土壤脲酶的动力学特征[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 42- 52.

Effect of pH on relationship between soil urease activity and Hg, Cd

HE Wen-xiang, ZHUMING-e, ZHANG Yiping

(College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The relationship between Lou soil urease activity and Hg, Cd was tested under different pH. The results show as follows: the optimum pH of soil urease is 5.5~6.0 and 8.0~9.0 among pH tested, and the optimal pH of soil urease would not change when soil was polluted by heavy metals, the order of ecological-toxicity is $Hg > Cd$, soil urease activity, reaction maximum velocity and reaction velocity constant can be indexes of pollutant by Hg and $Hg + Cd$, the reaction mechanism is mainly non-competition inhibition because urease K_m and V_{max} is unvaried and decreased respectively. This paper also proposed the critical concentration of Hg and Cd is 2.098 and 302.83 mg/kg respectively under different pH tested.

Key words: soil urease; pH; mercury; cadmium