

土壤脲酶和脱氢酶对活性 X3B 红污染暴露的耐受性及机理研究

程云, 周启星(中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016, E-mail: Zhouqixing@hot mail .com)

摘要:采用微宇宙实验方法,研究了棕壤、褐土、红壤等 3 种我国典型土壤中脲酶和脱氢酶对染料活性 X3B 红污染的耐受性及其机理。实验结果表明,3 种土壤中的脲酶和脱氢酶活性在试验较低浓度的活性 X3B 红污染的环境中均被促进,但被促进的程度有所差异,具体表现为棕壤脲酶活性被促进的效果最为明显,其次红壤,褐土最弱,较低浓度的活性 X3B 红污染对褐土脱氢酶活性的促进作用最强,其次红壤,棕壤最弱。3 种土壤的脲酶和脱氢酶活性被促进的效果随着时间的推移逐渐减弱。3 种土壤的脲酶和脱氢酶活性对高浓度的活性 X3B 红污染并没有显示受抑制的趋势。相反,二者基本维持在未受染料活性 X3B 红污染的对照土壤的活性水平。因此可以初步认为,土壤脲酶和脱氢酶对染料活性 X3B 红的污染暴露毒性有耐受作用。基于实验结果,还就 2 种酶对活性 X3B 红污染暴露的耐受机理进行了分析与探讨。

关键词:土壤环境;脲酶;脱氢酶;活性 X3B 红;耐受性

中图分类号:X171.5 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)02-07-0023

Endurance and Mechanisms of Soil Urease and Dehydrogenase Exposed to Reactive X3B Red Dye Contamination

Cheng Yun, Zhou Qixing(Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; E-mail: Zhouqixing@hot mail .com)

Abstract:Endurance and mechanisms of urease and dehydrogenase in three Chinese typical soils (burozom, cinnamon soil and red soil) exposed to the contamination of reactive X3B red dye were experimentally studied using the microcosmic method. The results indicated that the activities of urease and dehydrogenase were both promoted in the three soils by reactive X3B red dye in low dose, 500 and 1000 mg/L although the stimulating intensity was different from each other. For one thing, the activity of urease in burozom was promoted mostly followed by that in red soil and that in cinnamon was promoted most weakly. For the other, reactive X3B red dye in the same concentration could increase the activity of dehydrogenase in cinnamon soil most greatly and in burozom most weakly. However, the stimulating intensity of urease and dehydrogenase activities in the three soils was more and more fainter with the extension of days. Furthermore, reactive X3B red dye in high concentration (3000, 5000 and 10000 mg/L) could not inhibit the activities of urease and dehydrogenase in tested soils. On the contrary, all of them remained the level of the activities in unpolluted soils and no toxicity of reactive X3B red dye could reveal with time. Therefore, both enzymes in three types of soils had the tolerance to reactive X3B red dye. Based on the experimental data, relevant enduring mechanisms were also analyzed and discussed.

Keywords:soil environment; urease; dehydrogenase; reactive X3B red dye; endurance

染料的数量和种类不断地激增,由它引发的环境污染问题已逐渐暴露出来^[1, 2]。为了解决染料的环境污染问题,目前这方面的工作大多集中在含染料污水的脱色处理研究^[3, 4],而很少涉及染料的生态毒理效应和环境化学行为的认识^[5, 6]。为此,周启星等^[7~10]对土壤环境

中活性 X3B 红染料的淋溶、吸附和淹水释放行为及影响因素进行了研究,还就该染料对作物

基金项目:中国科学院“引进国外杰出人才”百人计划项目;国家重点基础研究发展规划项目(G1999011808)

作者简介:程云(1977~),女,硕士,现在美国攻读博士学位,主要从事污染生态毒理学、污染生态修复的研究。

收稿日期:2002-05-26;修订日期:2002-09-27

的生态毒性进行了探索。

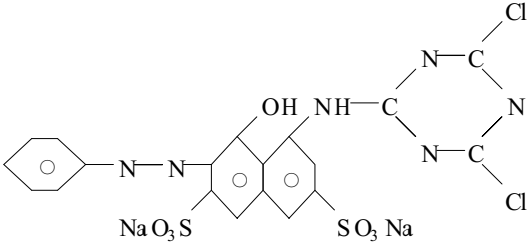
虽然偶氮染料是环境中存在的具有致癌风险^[9]的持久性有机污染物,但是土壤环境具有对污染物抗冲击、缓冲的能力^[11, 12],特别是土壤机体对污染物的自净功能,在一定程度上取决于土壤酶的生物学活性和作用^[13]。在土壤酶的作用下,一些污染物的降解过程被加速,一些污染物被土壤介质固定而失活的过程被促进。有研究表明^[12, 13],土壤脲酶在土壤氮素转化过程中起着重要作用,土壤脱氢酶则具有促进或加快对进入土壤中的污染物所起的还原固定和氧化降解作用。为了进一步了解该染料对诸如土壤营养物质代谢(如氮素、磷素的转化)和对有毒污染物的固定降解等基本生态过程是否产生影响,本文对棕壤、褐土和红壤这3种我国典型土壤中脲酶和脱氢酶活性的影响和作用机理进行研究。

1 材料与方法

1.1 供试化学品

供试化学品为活性 X3B 红,由沈阳第二印

染厂提供,纯度为 97.5%,20℃条件下溶解度为 80g/L,分子式为 C₁₉H₁₀Cl₂N₆Na₂O₇S₂,结构式如下:



实验所需试剂还包括:尿素、乙酸苯汞、氯化钾、二乙酰一肟、氨基硫脲、磷酸、浓硫酸、1%三苯基四氮唑氯化物溶液、CaCO₃、NaHSO₃和甲醇等,均为分析纯。

1.2 供试材料

供试土壤均为 0~20cm 表土,为我国 3 个有代表性的土类,包括未被污染的棕壤、褐土和红壤。棕壤采自辽宁省沈阳市郊,褐土采自山东省济南市郊,红壤采自浙江省金华市郊。土壤理化性质见表 1。

1.3 主要仪器设备

表 1 供试表土的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

土壤类型	pH (H ₂ O)	有机质 / %	总磷(以 P ₂ O ₅ 计) / %	总氮(以 N 计) / %	CEC / meq•(100g 土) ⁻¹	粘粒含量/ mm	
						< 0.001	< 0.01
棕壤	6.7	2.24	0.09	0.11	15.12	11.4	19.4
褐土	7.8	1.38	0.13	0.08	25.23	14.5	20.3
红壤	6.1	2.81	0.09	0.14	13.27	19.7	29.1

生化培养箱,容量瓶,三角瓶,带塞三角瓶,漏斗,沸水浴,751 分光光度计,振荡机。

1.4 方法与试验

分别称取 500g 过 2mm 筛的棕壤、褐土和红壤于 20cm×20cm 的塑料盆中,在自然条件下加水预培养 10d。根据污染调查所获土壤环境中可能出现的染料总浓度及活性 X3B 红单个染料的浓度范围,设置 6 个不同的试验值 0、500、1000、3000、5000 和 10000mg/kg 土;称取相同体积、相应浓度活性 X3B 红于塑料盆中,充分搅匀后静置。自加入染料活性 X3B 红起于第 1 天、第 3 天、第 5 天、第 10 天和第 20 天分别测定土壤中脲酶和脱氢酶的活性。由于水分

对酶活性有较大影响,通过每 2 天加入 10mL 水于每个处理塑料盆中,以达到在实验周期控制水分的目的。每个处理设 3 次重复。

土壤脲酶活性的测定采用尿素残留量法,即通过对新鲜土壤与尿素溶液在 37℃培养 5h 后,测定尿素残留量,估计脲酶的活性,具体步骤参见文献^[14],有关计算如(1)式:

$$a_1 = \frac{[10 - m_1 \times V_1 / (V_2 \times 1000)] \times 0.466}{m_2 t} \times 1000$$

(1)

式中, a₁ 为土壤脲酶的活性,在数值上等于单位时间内尿素态氮的减少量,单位为 mg•(kg•h)⁻¹,以 N 计; m₁ 表示测试样品溶液中尿素含

量,单位为 μg ; m_2 为土壤样品质量, 5g ; V_1 为浸提液总体积, mL ; V_2 为测定时吸取浸提液的体积, mL ; 0.466 为换算系数; t 为培养时间, 5h .

土壤脱氢酶活性采用三苯基四唑氯化物与溶液中的 H^+ 反应生成红色甲替进行比色测定,以溶液的光密度值表示酶活性,具体步骤参见文献[13],计算如(2)式:

$$\omega_2 = AV \times 150.35 \tag{2}$$

式中, ω_2 为土壤脱氢酶的活性,以 20g 土壤中 H^+ 的 μL 数表示; A 为 1mL 滤液中甲替的 mg 数; V 为滤液体积; 150.35 为换算系数.

为了消除比色时染料颜色的干扰,称取相同重量的土样放置于 150mL 的三角瓶中,用与其余试剂相同体积的蒸馏水补加,其它步骤相同.

2 结果与讨论

2.1 3 种未受污染的土壤脲酶活性的比较

由表 2 可以看出,未经活性 X3B 红染料处理的 3 种土壤的脲酶活性各不相同,但一般的趋势是:红壤 > 棕壤 > 褐土.这一方面可能是由于土壤类型的不同,使得引起土壤脲酶活性变化的因素如土壤有机质、 pH 和粘粒含量等存在很大的差异.通过与表 1 的比较,可以发现,土壤脲酶的活性大小正好随着土壤有机质含量的增加而增加,两者之间存在着一定的关系.

表 2 未经活性 X3B 红处理的 3 种土壤的脲酶活性

Table 2 The activity of urease in the soils without reactive X3B red dye addition					
土壤类型	脲酶活性(以 N 计)/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$				
	第 1 天	第 3 天	第 5 天	第 10 天	第 20 天
棕壤	61.23	74.93	87.56	90.12	90.25
褐土	58.94	71.36	85.65	88.31	88.29
红壤	74.86	88.37	95.16	100.29	100.63

另一方面,由于土壤的采集地不同,气温、降水和植被等生态条件的变化,导致了土壤脲酶活性的差异.有报道指出,土壤的通气状况对该酶活性有很大的影响^[15].也就是说,由于这些土壤在通气状况上有差异,导致了土壤脲酶

活性的不同.再说,由于土壤脲酶与土壤氮素转化过程直接有关,例如能酶促尿素的水解^[15],因此更为重要的机理可能是土壤培肥过程的差异,如红壤采自茶树园,长期施用有机肥,土壤通气状况得到改善,有利于土壤微生物的活动,因此对土壤脲酶活性有促进、增强作用;褐土来源于种植小麦的农田,近年来基本上停止施用有机肥,通气状况等土壤性质不断恶化;棕壤则来源于松树附近,该地块属于没有农业利用的荒地,不可能施用有机肥.因此,后两者土壤脲酶活性显然较红壤为低.还有,这些土壤由于有不同种类的植物生长,为其根际周围的微生物提供了不同种类、不同程度的营养条件,导致了土壤脲酶活性的差异.

研究还表明,3 种土壤中脲酶的活性都显示了随培养时间延长而逐渐增强的趋势.在培养的头 5 天内,棕壤、褐土和红壤脲酶的活性增加最快,分别依次达到整个培养期(20d)内脲酶增加总量的 90.7%、91.0%和 78.8%.在整个培养期内,褐土的脲酶活性增加最快,每天增加达到 $1.47\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$;棕壤次之,每天增加也达到 $1.45\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,基本接近褐土脲酶活性的增加量;红壤脲酶活性增加最少,每天增加为 $1.29\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$.这些土壤脲酶增加的机理,可能是风干后的土壤因加水培养后生物活性逐渐恢复而导致.对所得数据进行回归,得不同土壤中脲酶活性增加的动力学方程如(3)~(5)式:

$$S_{(1)} = 19.438\ln(T) + 62.207$$
$$(R^2 = 0.9547, n = 15, p < 0.005) \tag{3}$$

$$S_{(2)} = 19.941\ln(T) + 59.417$$
$$(R^2 = 0.9492, n = 15, p < 0.005) \tag{4}$$

$$S_{(3)} = 16.712\ln(T) + 75.86$$
$$(R^2 = 0.9807, n = 15, p < 0.005) \tag{5}$$

式中, $S_{(1)}$ 、 $S_{(2)}$ 和 $S_{(3)}$ 分别依次表示未加活性 X3B 红时棕壤、褐土和红壤的脲酶活性[$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$], T 为培养时间(d), R 为相关系数, p 为显著性水平, n 为处理数.

2.2 3 种未受污染的土壤脱氢酶活性的比较

3 种土壤中,红壤的脱氢酶活性最高,褐土的脱氢酶活性其次,棕壤的脱氢酶活性最弱(表 3)。这一顺序正好与土壤粘粒含量多少相一致,即:红壤 > 褐土 > 棕壤。这就是说,红壤可能拥有对有机污染物较强的净化功能。不过,土壤脱氢酶活性是否受土壤粘粒含量的支配,或者与粘粒中某些组分有关,有待进一步研究。另一方面,这一顺序还与土壤从南到北的地理分布相一致,即南方土壤的酶活性高,北方土壤的酶活性低。或许,最为重要的是,来自采样点生态条件的影响,特别是覆盖植物类型的不同,如茶树的根系较松树发达,有利于其分泌脱氢酶并促进了分泌脱氢酶的微生物大量繁殖,为土壤脱氢酶的大量来源创造了各种有利条件,因此红壤的脱氢酶活性较高;褐土来自于农田,作物根系也比松树发达,有关微生物的繁殖条件也相对较好,因此褐土的脱氢酶活性要比棕壤要大。

表 3 未经活性 X3B 红处理的 3 种土壤的脱氢酶活性

Table 3 The activity of dehydrogenase in the soils without reactive X3B red dye addition

土壤类型	脱氢酶活性/ $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$				
	第 1 天	第 3 天	第 5 天	第 10 天	第 20 天
棕壤	27.34	47.15	51.06	53.21	53.31
褐土	30.47	51.66	57.48	59.75	59.33
红壤	33.22	55.62	62.15	64.23	64.71

研究还表明,在培养开始的头 10d 内,3 种土壤中的脱氢酶活性都随时间的推移不断增强,在实验的第 10 天到第 20 天期间,土壤脱氢酶活性逐渐趋于稳定。这可能是风干后的土壤因加水培养后生物活性逐渐恢复而导致的。回归方程可表示如(6)~(8)式:

$$S_{(4)} = - 2.94 T^2 + 23.45 T + 8.42$$

$(R^2 = 0.9538, n = 5, p = 0.005)$

(6)

$$S_{(5)} = - 3.34 T^2 + 26.63 T + 8.61$$

$(R^2 = 0.9707, n = 5, p = 0.005)$

(7)

$$S_{(6)} = - 3.45 T^2 + 27.86 T + 10.36$$

$(R^2 = 0.9694, n = 5, p = 0.005)$

(8)

式中, $S_{(4)}$ 、 $S_{(5)}$ 和 $S_{(6)}$ 分别依次表示未加活性 X3B 红染料的棕壤、褐土和红壤的脱氢酶活性 [$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$].

比较表 2 和 3 可见,未被处理的 3 种土壤的脲酶活性明显高于未被处理的 3 种土壤的脱氢酶活性,其中红壤高出 1.53~2.25 倍,褐土高出 1.49~1.93 倍,棕壤高出 1.59~2.24 倍。可见,土壤随着培养时间的延长,3 种土壤在脲酶活性与脱氢酶活性的比值上,都经历了先较大幅度下降,然后较小幅度上升,最后稳定于某一比值上。这种差异,大概是各种土壤中分泌脱氢酶的微生物含量低引起的。

2.3 土壤脲酶对活性 X3B 红污染的耐受性及其机理

由图 1 可看出,在试验的较低浓度范围内,活性 X3B 红可以促进 3 种土壤中脲酶的活性的增强,即当活性 X3B 红浓度为 500 mg/kg 时,活性 X3B 红对棕壤、褐土和红壤脲酶活性的促进率按时间顺序依次分别为 18.4%、11.6%、4.0%、4.6%、4.0%; 5.4%、1.6%、2.2%、2.1%、2.1%; 5.9%、6.1%、2.5%、3.7%、3.5%。当活性 X3B 红的浓度为 1000 mg/kg 时,活性 X3B 红对棕壤、褐土和红壤的脲酶活性的促进率按时间顺序从投入活性 X3B 红的第 1、3、5、10 到第 20 天依次分别为 9.8%、5.0%、1.3%、2.0%、1.9%; 2.4%、3.1%、1.3%、1.5%、1.7%; 4.7%、3.5%、1.8%、2.5%、2.1%。这说明在试验较低浓度范围内,活性 X3B 红不仅可以激活土壤脲酶的活性,而且还作为营养物质被微生物吸收、利用,增加了微生物分泌的脲酶的数量。3 种土壤中,活性 X3B 红对棕壤的脲酶活性的促进作用最强,红壤依次,褐土最弱。可以认为,3 种土壤对染料活性 X3B 红的吸附程度有很大不同,以及各自的理化因素导致了这一差别^[8]。从时间上来看,3 种土壤的脲酶活性在第 1 天和第 3 天,被促进的效果最为明显,但随着时间的推移,其促进作用逐渐减弱。分析认为,染料在最初的几天里被土壤中的微生物吸收的量达到最大,并趋于饱和而使得活性 X3B 红不能继续被微生物

同化,最终分泌出脲酶.

图 2 说明,当活性 X-3 B 红的浓度高达

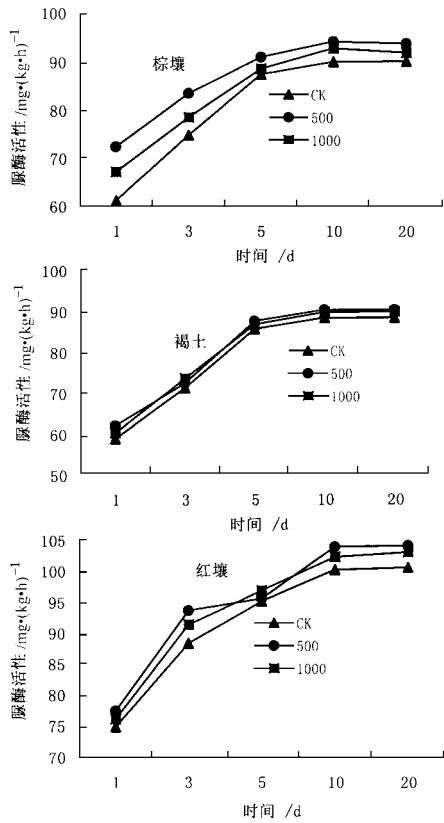


图 1 活性 X3B 红在较低试验浓度下对 3 种土壤脲酶活性的影响

Fig.1 Effects of reactive X-3B red dye in low concentration on the activity of urease in three types of soils

3000 5000 和 10000 mg/kg 时,3 种土壤的脲酶活性基本维持在未受染料活性 X-3B 红污染的对照土壤的脲酶活性水平.这可能是因为土壤对脲酶有一定的保护作用,一部分染料被土壤吸附;或者是由于分泌脲酶的微生物尽管不能利用活性 X-3B 红作为生长过程所需养分,但却对染料活性 X-3B 红的毒性有耐受性,脲酶活性没有明显的变化.

2.4 土壤脱氢酶对活性 X-3B 红污染的耐受性及其机理

土壤脱氢酶活性大小反映土壤对输入其机体的污染物具有自净功能的状态,是对土壤解毒能力的定量表征.由图 3 可以看出,低浓度的活性 X-3B 红染料可以促进 3 种土壤中

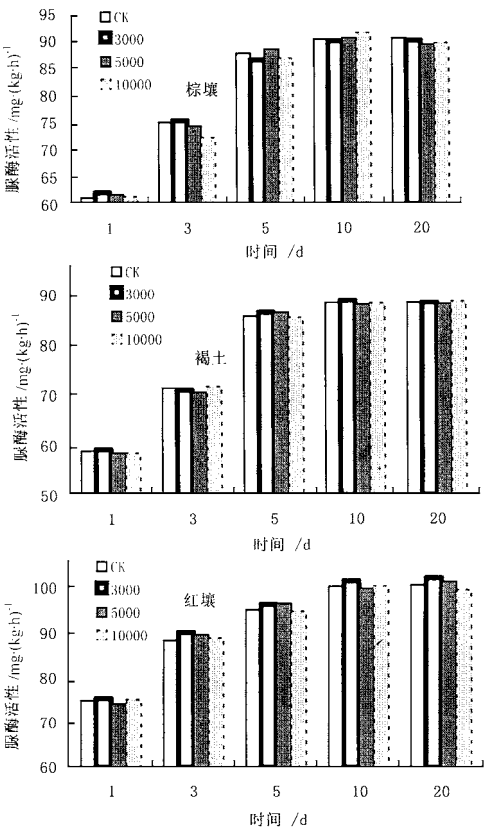


图 2 活性 X3B 红在高浓度下对 3 种土壤脲酶活性的影响
Fig.2 Effects of reactive X-3B red dye in high concentration on the activity of urease in three types of soils

的脱氢酶活性,即当活性 X-3B 红浓度为 500 mg/kg 时,活性 X-3B 红对棕壤、褐土和红壤脱氢酶活性的促进率按时间顺序依次为: 9.7%、5.1%、4.7%、3.8%、2.6%; 12.1%、4.9%、4.8%、4.6%、4.1%; 8.4%、7.6%、6.0%、5.0%、4.6%.当活性 X-3B 红的浓度为 1000 mg/kg 时,活性 X-3B 红对棕壤、褐土和红壤脱氢酶活性的促进率按时间顺序依次为 3.0%、3.0%、3.0%、2.6%、1.1%; 6.6%、6.2%、2.7%、2.4%、1.1%; 5.1%、5.0%、3.9%、3.3%、2.4%.这说明微生物可以利用较低浓度活性 X-3B 红为其自身生长和增值所必需的碳源、氮源加以利用,增强了微生物分泌脱氢酶的能力.但是,当活性 X-3B 红的浓度为 500 mg/kg 时,其对土壤脱氢酶活性的促进作用,较活性 X-3B 红浓度为 1000 mg/kg 时的促

进作用更为明显.3 种土壤中,活性 X3B 红对褐土脱氢酶活性的促进作用最强,红壤依次,棕壤最弱.由于土壤的理化因素存在很大的差异,一方面对染料活性 X3B 红的吸附程度有很大不同,另一方面决定土壤脱氢酶活性的重要因素粘粒含量和水分也可能导致了这一差别^[7, 8].

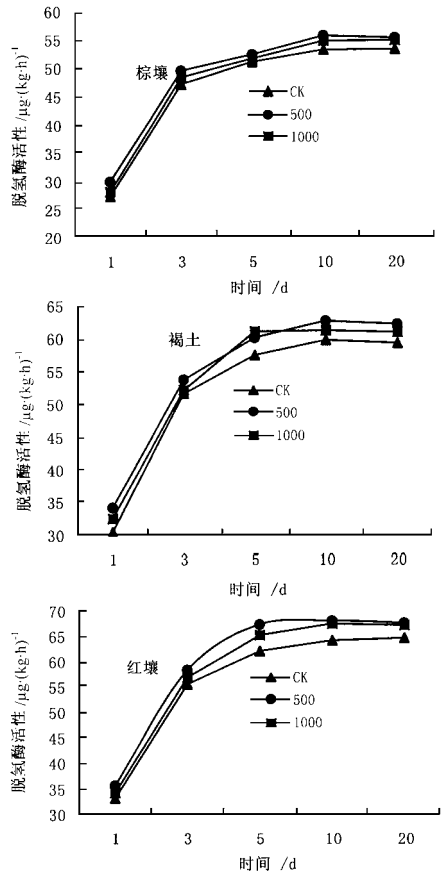


图 3 活性 X3B 红在试验较低浓度下对 3 种土壤脱氢酶活性的影响

Fig.3 Effects of reactive X3B red dye in low concentration on the activity of dehydrogenase in three types of soils

从反应时间上来看,3 种土壤的脱氢酶活性在实验的头 10 天内,被促进的效果最为明显.但随着时间的推移,在试验的第 10 ~ 20 天内,其促进作用逐渐减弱.分析认为,土壤中的微生物在最初的几天里吸收了大部分所能利用的染料,使得活性 X3B 红不能继续被微生物同化,脱氢酶数量的增加减弱.

图 4 说明,当活性 X3B 红的浓度高达 3000 5000 10000 mg/kg 时,3 种土壤的脱氢酶活性基本保持在未受染料活性 X3B 红污染的对照土壤的脱氢酶活性 ± 1 范围内波动.这可能是因为土壤能够吸附一部分染料,掩盖了活性 X3B 红的毒性;或者是由于分泌脱氢酶的微生物和脱氢酶的活性作用中心对染料活性 X3B 红的毒性有一定的耐受性,以至于表现出的土壤脱氢酶活性并没有大的波动.在试验期内,染料活性 X3B 红的毒性也没有因时间而有所改变.

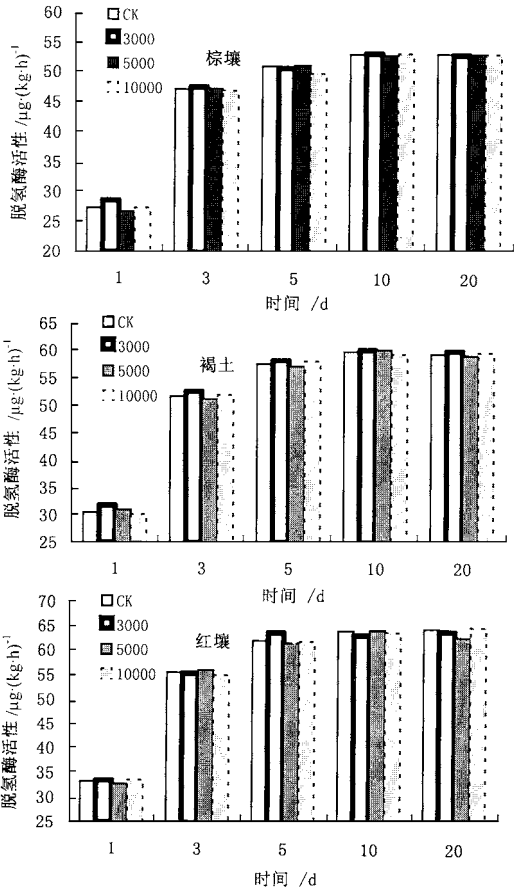


图 4 活性 X3B 红在高浓度下对 3 种土壤脱氢酶活性的影响

Fig.4 Effects of reactive red dye in high concentration on the activity of dehydrogenase in three types of soils

3 结论

(1) 3 种未受污染的土壤脲酶和脱氢酶活性存在很大差异,并分别显示了随时间其不同

活性增强的趋势。

(2) 试验较低浓度的活性 X-3B 红可以促进 3 种土壤中的脲酶活性,以对棕壤脲酶活性的促进作用最强,红壤依次,褐土最弱;从时间上来看,3 种土壤的脲酶活性在开始的几天内,被促进的效果最为明显,但随着时间的推移,其促进作用逐渐减弱。3 种土壤的脲酶对高浓度的活性 X-3B 红并没有显示受抑制的趋势。相反,脲酶活性基本维持在未受染料活性 X-3B 红污染的对照土壤的脲酶活性水平。活性 X-3B 红的毒性也不因时间而有所变化。因此可以认为,土壤脲酶对染料活性 X-3B 红的毒性作用有较强的耐受、解毒能力。

(3) 3 种土壤中的脱氢酶活性不同程度地受到了较低试验浓度的活性 X-3B 红的促进作用,其中以对褐土脱氢酶活性的促进作用最强,红壤依次,棕壤最弱。3 种土壤中脱氢酶活性被促进的效果随着时间的推移逐渐减弱。高浓度的活性 X-3B 红并没有显示对 3 种土壤脱氢酶的毒性,脱氢酶活性保持在未受染料活性 X-3B 红污染的对照土壤的脱氢酶活性水平。从时间上看,活性 X-3B 红的毒性没有大的变化。因此可以说,土壤的脱氢酶对高浓度的活性 X-3B 红污染具有较强的耐受能力。

参考文献:

- 1 Zhou Qixing. Chemical pollution and transport of organic dyes in water-soil-crop systems of the Chinese coast. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **66** (6): 784 ~ 793.
- 2 Chung K T. The significance of azo-reduction in the mutagenesis and carcinogenesis of azo dyes. *Mut. Res.*, 1983, **114**: 269 ~ 275.
- 3 贾省芬,杨惠芳,刘双江. 硫酸盐还原菌对多种染料厌氧脱色的特性. *环境科学*, 1998, **19**(4): 18 ~ 21.
- 4 李家珍. 染料染色工业废水处理. 北京:化学工业出版社, 1994. 68 ~ 78.
- 5 Brown M A. Predicting azo dye toxicity. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 1993, **23**(3): 249 ~ 254.
- 6 Sobti R C, Gill G B, Juneja T R. Evaluation of genotoxicity certain azo and azoxy compounds through chromosomal aberrations; sister chromatid exchanges and sperm head abnormality assays. *Med. Sci. Res.*, 1992, **20**(10): 373 ~ 380.
- 7 周启星. 土壤环境中活性 X-3B 红染料的淋溶行为与淹水释放模拟研究. *环境科学学报*, 2001, **21**(1): 49 ~ 54.
- 8 周启星, 贾宏宇, 唐翔宇. 土壤环境中活性 X-3B 红染料的吸附行为及有关影响因素. *环境科学*, 2002, **23**(2): 82 ~ 86.
- 9 Cheng Yun, Zhou Qixing. Jointly ecological toxicity of reactive X-3B red dye and cadmium acting on wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Environmental Sciences*, 2002, **14** (1): 136 ~ 140.
- 10 程云, 周启星, 宋玉芳等. 活性 X-3B 红染料对作物生态毒理指标影响的比较研究. *应用生态学报*, 2002, **13**(2): 133 ~ 136.
- 11 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学. 北京:科学出版社, 2001. 24 ~ 51.
- 12 何振立, 周启星, 谢正苗. 土壤有益及有害元素平衡. 北京:中国环境科学出版社, 1998. 1 ~ 33.
- 13 周礼恺. 土壤酶学. 北京:科学出版社, 1987. 331 ~ 332.
- 14 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 2000. 251 ~ 252.
- 15 中国科学院林业土壤研究所等. 全国土壤酶学研究文集. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1988. 9 ~ 12.