

用 TTC 与 INT-电子传递体系活性表征重金属对污泥活性的影响

尹军^{1,2}, 谭学军¹, 任南琪¹

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 吉林建筑工程学院环境工程系, 长春 130021)

摘要:研究了不同浓度的 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^{+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性产生的影响, 比较了这 2 个参数在表征污泥活性受重金属抑制时的灵敏性. 结果表明, 各种重金属抑制污泥 TTC-电子传递体系活性的 IC_{50} 小于抑制 INT-电子传递体系活性的 IC_{50} , TTC-电子传递体系活性反映重金属毒性作用的灵敏性大于 INT-电子传递体系活性. 实验的重金属离子呈现出不同的毒性作用, 以 TTC-电子传递体系活性为评价参数, 毒性顺序为: $\text{Hg}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$, 以 INT-电子传递体系活性为评价参数, 毒性顺序为: $\text{Hg}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$.

关键词:活性污泥; 电子传递体系活性; 重金属; 碘硝基四氮唑; 2, 3, 5-氯化三苯基四氮唑

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2005)01-0056-07

Evaluation of TTC and INT-Electron Transport System Activity Tests for Heavy Metal Inhibition of Activated Sludge

YIN Jun^{1,2}, TAN Xue-jun¹, REN Nan-qi¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: The effects of Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} and Ag^{+} on TTC and INT-electron transport system activity are studied and the sensitivities of TTC and INT-electron transport system activity to seven tested heavy metals are compared to evaluate both the parameters for assessing heavy metal inhibition of activated sludge. The median inhibitory concentration (IC_{50}) of seven tested heavy metals measured via TTC-electron transport system activity is less than that measured via INT-electron transport system activity, which indicates that the INT-electron transport system activity is less sensitive to heavy metals than the TTC-electron transport system activity. The ranking of tested heavy metals in order of decreasing toxicity based on TTC-electron transport system activity was Hg^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ag^{+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} and Pb^{2+} , and the ranking based on INT-electron transport system activity was Hg^{2+} , Ag^{+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} and Pb^{2+} .

Key words: activated sludge; electron transport system activity; heavy metals; INT; TTC

污泥的电子传递体系 (Electron Transport System, ETS) 活性是应用较多的污泥生物活性评价方法之一, 该方法实质上是通过测定好氧微生物的呼吸活性来间接指示活性污泥的生物活性^[1,2]. 氧化还原染料 (Oxidoreduction Dyes) 常作为一种人工电子受体来检测污泥的 ETS 活性, 它在微生物电子传递体系的作用下会接受电子而还原, 并发生明显的颜色变化. 氧化还原染料的还原产物为三苯基甲脂 (Formazan), 其生成速率可反映污泥 ETS 活性的大小, 污泥活性出现任何异常变化都可导致 Formazan 生成速率及污泥 ETS 活性的改变^[3,4]. 当污水中出现重金属等毒性物质时, 污泥 ETS 活性可较早地预告污泥生物活性的改变, 甚至可反映出毒性物质影响污泥活性的等级^[5]. 该方法可同时检测的样品数量不受限制, 操作简便, 适于现场应用, 所需的仪器设备均是实验室常规仪器.

用于检测污泥 ETS 活性的氧化还原染料主要包括 TTC (2, 3, 5-triphenyltetrazolium Chloride) 和 INT (2-(p-iodophenyl)-3-(p-nitrophenyl)-5-phenyl Tetrazolium Chloride)^[2]. 这 2 种四唑盐含有不同的官能团, 这决定了它们在检测污泥 ETS 活性时具有不同的特性^[6]. TTC 的氧化还原电位较高 (+490mV), 对电子的亲合力小, 与氧竞争电子的能力弱. 因此, 在用 TTC 检测污泥 ETS 活性时, 需包含除氧步骤, 以避免氧对实验结果的干扰. 另外, TTC 也不适合检测厌氧和反硝化脱氮污泥的生物活性. INT 的氧化还原电位较低 (+90mV), 对电子的亲合力大, 与氧竞争电子的能力强, 实验可在有氧

收稿日期: 2004-01-15; 修订日期: 2004-03-12

基金项目: 吉林省重大科技发展规划项目 (20010429); 吉林省重点科技项目 (吉计高技联字 [2001]1115 号)

作者简介: 尹军 (1954~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制技术研究.

条件下进行,可用于检测好氧、厌氧及脱氮污泥的生物活性^[1,2,7,8].

目前,随着 TTC 和 INT-电子传递体系活性检测方法的日趋成熟,这 2 个参数各自的特点已日渐清晰,但何者适合于表征污泥活性受重金属的影响却尚无文献报道,现有研究大多是在考察这 2 个参数的检测方法时,尝试性地探讨它们表征污泥活性受某一种重金属影响的可行性.本文旨在通过研究不同浓度的 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ag^{+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性产生的影响,系统地比较这 2 个参数在表征污泥活性受重金属抑制时的灵敏性,为今后选择合适的参数来预测和评价污水中重金属的毒性提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验污泥

实验污泥取自实验室间歇运行的 SBR 法活性污泥系统,污泥浓度约为 4500mg/L.该反应器的有效容积为 40L,原水以啤酒加适量的自来水稀释配制,进水 COD 浓度约为 400mg/L,溶解氧维持在 2.0mg/L 以上,pH 值 7.0~7.5,运行温度控制在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$.

1.2 主要试剂与仪器

(1) 重金属化合物 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 ZnCl_2 、 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 、 HgCl_2 、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 AgNO_3 . 本研究所用试剂均为分析纯.

(2) 分析污泥 ETS 活性所用主要试剂及制备

①0.4% TTC 溶液:取 4g TTC 溶于少量蒸馏水中,再稀释至 1L,贮存于茶色容量瓶中. ②0.2% INT 溶液:取 2g INT 溶于少量蒸馏水中,再稀释至 1L,贮存于茶色容量瓶中. ③Tris-HCl 缓冲液(pH=8.4):称取 6.037g 的 Tris(三羟甲基氨基甲烷),溶于 20mL 1mol/L 的 HCl 中,再定容至 1L. ④0.36% Na_2SO_3 溶液:取 3.6g Na_2SO_3 溶于 1L 蒸馏水中.

(3) 主要仪器 HZS-H 型水浴振荡器,LD5-2A 型离心机,721-可见分光光度计,AUY220 型电子天平.

1.3 分析方法

(1) TTC-电子传递体系活性 取 1mL 污泥混合液,置于 10mL 的离心管中,再向其中加入 1.5mL 的 Tris-HCl 缓冲溶液、0.5mL 的 0.36% Na_2SO_3 溶液和 2mL 的 0.4% TTC 溶液.迅速将制备好的样品放在 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的水浴振荡器内振荡培养 30min,

然后加 1mL 的 37% 甲醛终止酶反应,以上操作均在暗处进行.将该样品在 4000r/min 下离心 5min,轻轻弃去上清液,加入 5mL 的丙酮,搅拌混合均匀后,继续在 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下暗处振荡萃取 10min.待样品萃取完毕,在 4000r/min 下再离心 5min,将上清液和沉淀污泥分离.用分光光度计在 485nm 处读取萃取液的吸光度.经离心的沉淀污泥在 $(105 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下烘干 1h 后测干重. TTC-电子传递体系活性的计算公式如下:

$$\text{ETS}_t = \frac{D_{485} V}{k_t W t} \quad (1)$$

式中, ETS_t 为 TTC-电子传递体系活性 $[\mu\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}]$, D_{485} 为波长 485nm 处的上清液吸光度, V 为萃取剂体积(mL), k_t 为标准曲线斜率, W 为污泥干重(mg), t 为培养时间(h).

(2) INT-电子传递体系活性 向 10mL 的离心管中依次加入 0.3mL 的污泥混合液、1.5mL 的 Tris-HCl 缓冲溶液和 1mL 的 0.2% INT 溶液.迅速将制备完成的样品放在 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的水浴振荡器内,暗处振荡培养 30min,然后加 1mL 的 37% 甲醛终止酶反应.将该样品在 4000r/min 下离心 5min,轻轻弃去上清液,加入 5mL 甲醇,混合搅拌均匀,继续在 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下暗处振荡萃取 10min.在 4000r/min 下再离心 5min,并在分光光度计的 485nm 处读取萃取液的吸光度.经离心的沉淀污泥在 $(105 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下烘干 1h 后测干重. INT-电子传递体系活性的计算公式如下:

$$\text{INT}_t = \frac{D_{485} V}{k_t W t} \quad (2)$$

式中, ETS_t 为 INT-电子传递体系活性 $[\mu\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}]$, D_{485} 为波长 485nm 处的上清液吸光度, V 为萃取剂体积(mL), k_t 为标准曲线斜率, W 为污泥干重(mg), t 为培养时间(h).

1.4 实验方案

检测污泥活性之前,污泥样品先曝气 2h,以保证所有外源基质被耗尽.然后从中取出一系列体积为 50mL 的污泥混合液,污泥浓度均控制在 2000mg/L 左右,并同时测定这些污泥样品的初始 TTC 和 INT-电子传递体系活性.为消除 pH 值对实验结果的影响,用磷酸盐缓冲溶液将样品 pH 值调节为 7.5.根据实验确定的重金属浓度梯度,向这些样品中加入不同量的重金属.将样品置于振荡器上振荡 2h 后,同时测定抑制后的污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性.考虑到缺乏外源基质的污泥 ETS

活性较低,在测定所有污泥样品 ETS 活性之前,加入一定量的乙酸钠(500mg/L)促进污泥 ETS 活性。

1.5 实验结果的线性化

利用 Johnson 等人所介绍的 I 参数^[3],将重金属浓度与污泥 ETS 活性的抑制百分比之间的关系线性化:

$$I = \frac{\text{抑制百分比}}{100 - \text{抑制百分比}} \quad (3)$$

公式(3)仅适用污泥活性的抑制百分比在 5%~95%之间,这个范围之外的数据会影响实验结果的线性化。利用最小二乘法可以确定重金属浓度与 I 参数之间的线性回归方程,这条直线上对应 I 等于 1 的重金属浓度即为可抑制 50%污泥 ETS 活性的重金属浓度,也称 50%抑制浓度 IC_{50} (Median Inhibitory Concentration)。

2 结果与讨论

2.1 Cu^{2+} 对污泥 ETS 活性的影响

生物环境中的重金属一般可通过抑制某些酶系统的活性,进而影响微生物的电子传递体系活性。其中有些重金属容易与微生物的酶蛋白结合而使之变性,有些重金属容易与酶分子上的 $-SH$ 基发生可逆的结合而引起酶活性的下降,从而抑制微生物的生长。 Cu^{2+} 就是可与 $-SH$ 基相结合的重金属离子之一^[9,10]。

城市污水中的 Cu^{2+} 主要来源于某些工业废水,如漂洗和电镀废水就含有大量的 Cu^{2+} ^[11]。图 1 是利用本研究建立的分析方法得到的 Cu^{2+} 抑制污泥 ETS 活性的实验结果。图 1 中,上部为污泥活性的抑制百分比和重金属浓度之间的关系曲线,下部为 I 参数与重金属浓度之间的回归曲线。

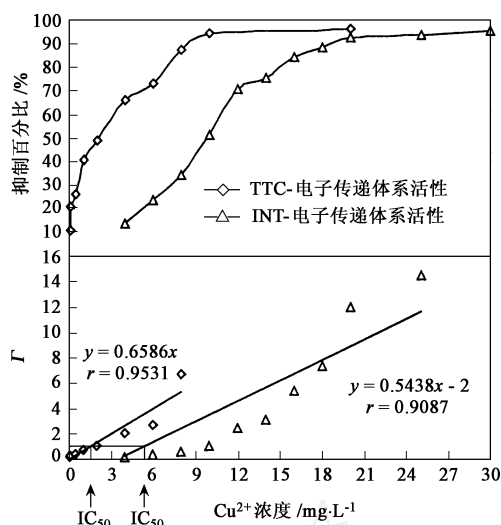


图 1 Cu^{2+} 对污泥 TTC 和 INT 电子传递体系活性的抑制

Fig. 1 Inhibitory effect of Cu^{2+} on TTC and INT-electron transport system activity tests

从图 1 可见, Cu^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性产生不同的影响,较低浓度的 Cu^{2+} 还会对污泥 INT-电子传递体系活性产生促进作用。利用 I 参数求出的 Cu^{2+} 抑制污泥 TTC-电子传递体系活性的 IC_{50} 小于抑制 INT-电子传递体系活性的 IC_{50} , 分别为 1.52mg/L 和 5.52mg/L。该实验结果说明,在用 TTC-电子传递体系活性表征污泥活性受 Cu^{2+} 毒性的抑制时,其灵敏性大于 INT-电子传递体系活性。

Anderson 等人也曾发现 INT-电子传递体系活性反映 Cu^{2+} 毒性作用的灵敏性不如 TTC-电子传递体系活性^[3]。究其原因,可能是由于 TTC 和 INT 从微生物氧化呼吸链上接受电子的部位不同所致(图 2)^[6,9]。

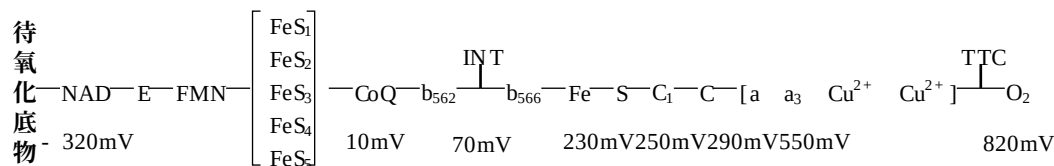


图 2 TTC 和 INT 从微生物呼吸链上接受电子的部位

Fig. 2 Sites of electron transfer to TTC and INT in the electron transport chain

从图 2 可看出, TTC 是从微生物氧化呼吸链的末端接受电子,电子在呼吸链上经历了一个完整的传递过程,其中任何一部分电子传递过程受到影响都会对 TTC-电子传递体系活性产生抑制作用,所以 TTC-电子传递体系活性很容易被抑制。而 INT

较早地从呼吸链上接受电子,它创造了一个“人工 INT 呼吸”过程。对于这一过程而言,如果电子在细胞色素 b 以后的传递过程被阻断, INT-电子传递体系活性并不会受到影响,只有细胞色素 b 之前的电子传递过程被阻断后,其活性才能受到抑制,因此

INT-电子传递体系活性受影响的几率要小一些.

2.2 Zn^{2+} 对污泥 ETS 活性的影响

锌是微生物生长所必需的元素,但浓度太高则会产生一定的毒害作用,当水体中 Zn^{2+} 浓度达到 1mg/L 时,就会对水体中的生物氧化作用产生轻微的抑制.冶金、电镀、炼油等行业排出的废水中都含有 Zn^{2+} [11].在现有关于重金属影响污泥 TTC-电子传递体系活性的研究文献中, Zn^{2+} 是研究最多的重金属. Klapwijk 等人发现, 200mg/L 的 Zn^{2+} 仅能抑制 37 % 的 TTC-电子传递体系活性,因此认为,当污水中出现毒性物质时, TTC-电子传递体系活性不适合用于反映污泥生物活性的变化 [5]. 而 Ryssov-Nielsen 认为导致上述结果的原因是 Klapwijk 等人的 TTC-电子传递体系活性检测方法存在问题. 他改进了 Klapwijk 等人的测定方法,准确地检测出 Zn^{2+} 对污泥生物活性产生的抑制作用 [7], 此后,其他研究者一致认为 TTC-电子传递体系活性是表征污泥活性受重金属影响的有效参数 [3, 12, 13]. 在本实验研究中,不同浓度的 Zn^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性产生的抑制作用,如图 3 所示.

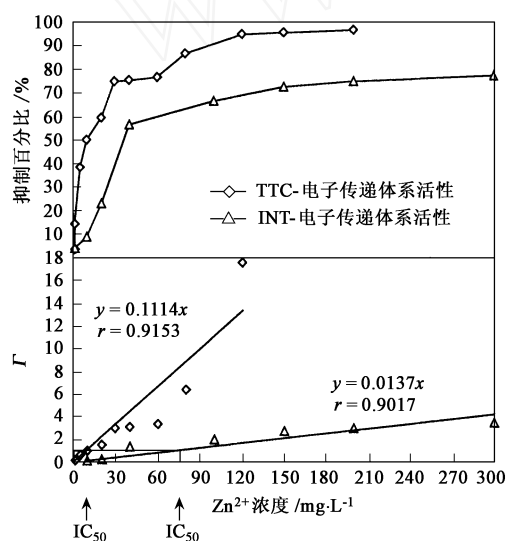


图3 Zn^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的抑制

Fig. 3 Inhibitory effect of Zn^{2+} on TTC and INT-electron transport system activity tests

从图 3 可见, Zn^{2+} 抑制污泥 TTC-电子传递体系活性的 IC_{50} 小于抑制 INT-电子传递体系活性的 IC_{50} , 分别为 8.98mg/L 和 72.99mg/L , 这说明污泥 TTC-电子传递体系活性反映 Zn^{2+} 毒性作用的灵敏性大于 INT-电子传递体系活性. 另外, Zn^{2+} 抑制污泥 TTC-电子传递体系活性的能力也较强, Zn^{2+} 可

以使 90 % 以上的 TTC-电子传递体系活性受抑制, 对 INT-电子传递体系活性而言, 则只能抑制 70 % 左右就已趋于稳定.

2.3 Cd^{2+} 对污泥 ETS 活性的影响

镉的毒性较大,可在微生物体内积蓄,导致很多酶失去活性,干扰微生物的正常代谢过程 [14]. 当水体中出现 0.1mg/L 的 Cd^{2+} 时,可使地表水的自净作用轻度地受抑制. 本研究获得的 Cd^{2+} 抑制污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的结果如图 4.

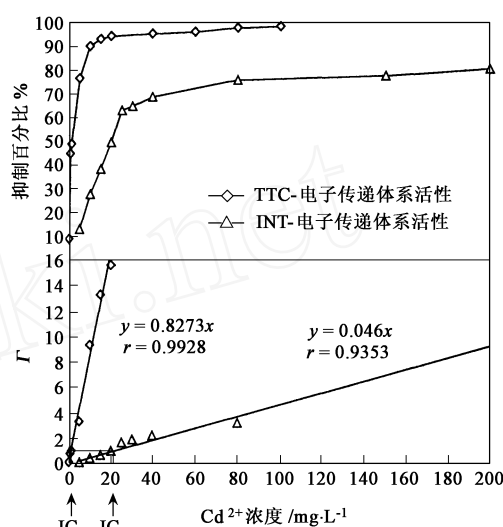


图4 Cd^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的抑制

Fig. 4 Inhibitory effect of Cd^{2+} on TTC and INT-electron transport system activity tests

从图 4 可见, Cd^{2+} 对污泥 TTC-电子传递体系活性产生很强的抑制作用,其 IC_{50} 仅为 1.21mg/L , 这表明 TTC-电子传递体系活性对 Cd^{2+} 的毒性作用非常敏感. 从 TTC-电子传递体系活性的 r 参数与 Cd^{2+} 浓度之间的回归方程也可看出,两者之间的线性关系非常好,回归系数为 0.9928. 而在用 INT-电子传递体系活性来表征 Cd^{2+} 对污泥活性的影响时,其灵敏性不如 TTC-电子传递体系活性, IC_{50} 为 21.74mg/L .

2.4 Hg^{2+} 对污泥 ETS 活性的影响

汞属于剧毒物质,可在微生物体内积蓄,并会通过食物链的生物浓缩和生物放大作用而威胁人类的健康. 目前,汞已被列为环境毒理学研究的典型和优先的金属污染物. Hg^{2+} 对酶活性会产生很强的抑制作用,与 $-SH$ 基有很强的亲和性,而这种结合又很不容易分离. Hg^{2+} 一方面可与酶活性中心以外的 $-SH$ 基可逆地结合,使酶活性中心的空间构型发生改变,从而抑制生物活性. 另一方面,一些参与物质

代谢的重要酶类,如细胞色素氧化酶、琥珀酸脱氢酶和乳酸脱氢酶等,由于它们的活性中心本身就是—SH基,所以 Hg^{2+} 与这些—SH基相结合后,可使酶失去活性.此外, Hg^{2+} 也可作用于细胞膜上的—SH基,改变细胞膜的功能,进而影响生物活性^[14].

水体汞污染的主要来源是含汞的工业废水的排放,氯碱、塑料、电池和电子等工业排放的废水都是水环境汞污染的主要原因^[11].通过向活性污泥中加入不同量的 HgCl_2 ,本研究获得的 Hg^{2+} 抑制污泥 ETS 活性的实验结果见图 5.

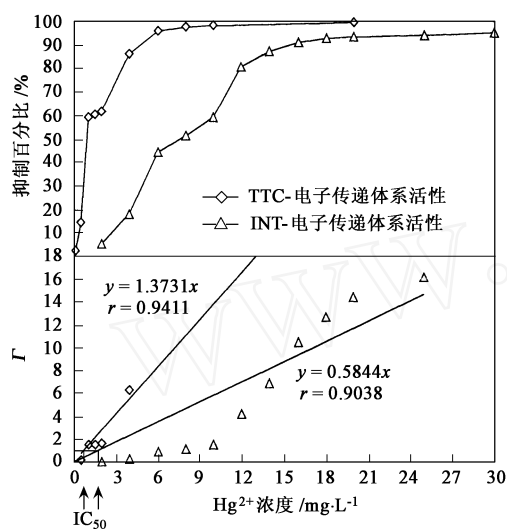


图 5 Hg^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的抑制

Fig. 5 Inhibitory effect of Hg^{2+} on TTC and INT-electron transport system activity tests

从图 5 可见, Hg^{2+} 对污泥的生物活性确实有极强的抑制作用,当 Hg^{2+} 浓度仅为 0.73mg/L 时,就可抑制 50 % 的污泥 TTC-电子传递体系活性,而抑制 INT-电子传递体系活性的 IC_{50} 也仅为 1.71mg/L . 该实验结果也表明,在用 TTC-电子传递体系活性来表征 Hg^{2+} 对污泥活性的影响时,其灵敏性高于 INT-电子传递体系活性.

2.5 Ni^{2+} 对污泥 ETS 活性的影响

城市污水中 Ni^{2+} 主要来源于某些工业废水^[11]. Ni^{2+} 可抑制某些酶系统,如酸性磷酸酶. 图 6 是不同浓度的 Ni^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性所产生的影响.

图 6 表明, Ni^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性产生不同的抑制作用,其 IC_{50} 分别为 16.89mg/L 和 357.14mg/L . 该结果表明,在用

INT-电子传递体系活性来表征重金属对污泥活性的影响时,其灵敏性仅是 TTC-电子传递体系活性的 $1/20$ 左右.

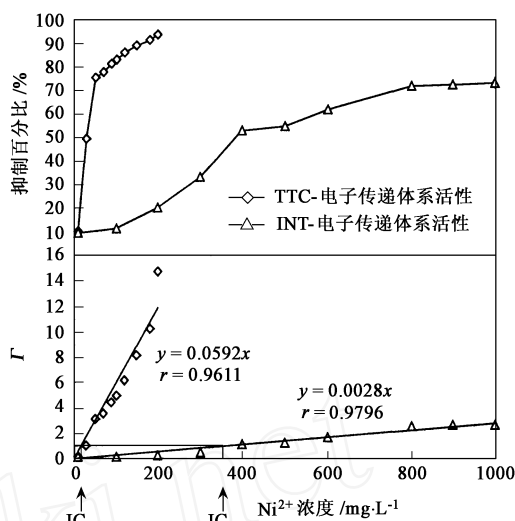


图 6 Ni^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的抑制

Fig. 6 Inhibitory effect of Ni^{2+} on TTC and INT-electron transport system activity tests

2.6 Pb^{2+} 对污泥 ETS 活性的影响

据报道, Pb^{2+} 可影响细胞呼吸、氧化磷酸化和 ATP 合成等过程^[14]. 水体中 Pb^{2+} 的主要污染源是蓄电池、冶炼、五金、机械、涂料和电镀等工业排放的废水^[11]. 本研究获得 Pb^{2+} 抑制污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的实验结果如图 7 所示.

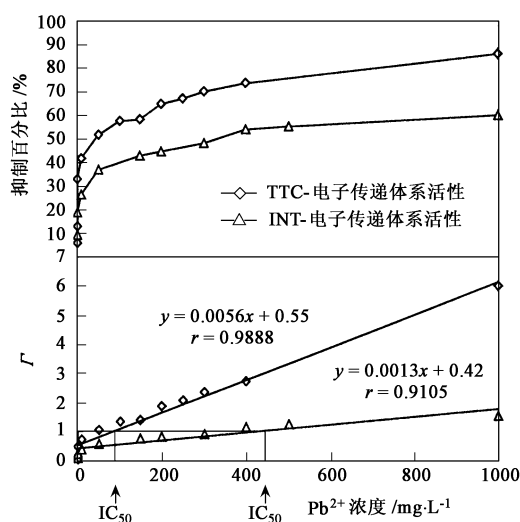


图 7 Pb^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的抑制

Fig. 7 Inhibitory effect of Pb^{2+} on TTC and INT-electron transport system activity tests

从图 7 可见, Pb^{2+} 对污泥 TTC 和 INT-电子传

递体系活性产生的抑制作用相对较弱. Pb^{2+} 抑制污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的 IC_{50} 分别为 80.36mg/L 和 446.15mg/L,该结果也表明 TTC-电子传递体系活性反映 Pb^{2+} 毒性作用的灵敏性高于 INT-电子传递体系活性.

2.7 Ag^+ 对污泥 ETS 活性的影响

Ag^+ 也是可与 $-\text{SH}$ 基发生可逆结合的重金属离子之一.目前,有关 Ag^+ 对污泥 ETS 活性影响的研究未见报道.水体银的主要污染源是感光材料的

生产、胶片洗印、印刷制版、冶炼、金属及玻璃镀银等行业排放的废水.由于银的回收,污水中 Ag^+ 的含量一般较低^[11].图 8 为本研究获得的 Ag^+ 抑制污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的实验结果.

从图 8 可见, Ag^+ 对污泥 ETS 活性表现出很强的抑制作用,由 I' 参数求出的 Ag^+ 抑制 TTC 和 INT-电子传递体系活性的 IC_{50} 仅为 1.78mg/L 和 5.36mg/L.该实验结果表明,较低浓度的 Ag^+ 就会对污泥活性产生毒害作用,因此尽管 Ag^+ 在城市污水中的含量较低,但它给环境带来的负面影响却不容忽视.

3 本研究与相关文献实验结果的比较

表 1 把现有涉及重金属抑制污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的研究文献做了总结,并将其中的 IC_{50} 与本研究的实验结果进行了比较^[3,5,7,12,13,15,16].

从表 1 可见,本研究获得的 IC_{50} 与文献中报道的 IC_{50} 之间存在一定的差异,究其原因,这可能是活性污泥的来源不同所致.其他研究者也注意到这一问题,Anderson 等人发现以 Cu^{2+} 为生物活性抑制剂时,不同批次污泥得到的 IC_{50} 是不相同的(INT-电子传递体系活性为 5.1 和 2.5mg/L;OUR 为 6.0 和 6.1mg/L)^[3].King 等人也发现同种重金属而来源不同的污泥所实验出的 IC_{50} 存在差别,特别是对于实际污水厂的污泥,这种差异性会更大^[17].

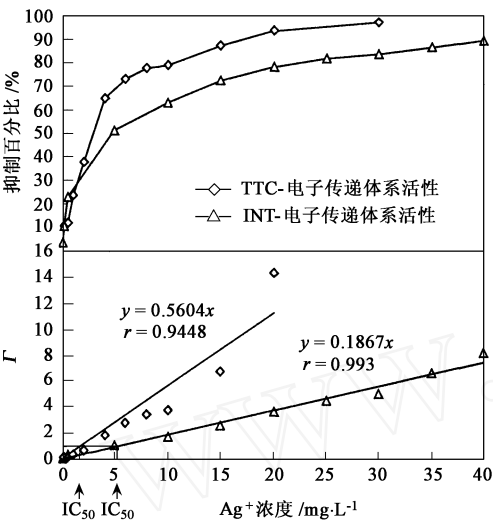


图 8 Ag^+ 对污泥 TTC 和 INT-电子传递体系活性的抑制

Fig. 8 Inhibitory effect of Ag^+ on TTC and INT-electron transport system activity tests

表 1 本研究与文献报道的 IC_{50} 比较

Table 1 Comparison of the present study's results with IC_{50} reported in the literature

氧化还 原染料	$\text{IC}_{50}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$							参考文献
	Cu	Zn	Cd	Hg	Ni	Pb	Ag	
TTC	1.52	8.98	1.21	0.73	16.89	80.36	1.78	本研究
INT	5.52	72.99	21.74	1.71	357.14	446.15	5.36	本研究
INT	2.5~5.1	20	14	6	190	18		[3]
TTC				5.1				[3]
TTC		< 200						[5]
TTC		24		1.5				[7]
TTC	2.1	24		1.5				[12]
TTC		< 200						[13]
TTC					88			[15]
TTC	1.9	23	39	2.6				[16]

4 结论

(1)实验的 7 种重金属离子对污泥 ETS 活性呈现出不同的抑制作用,对于 TTC-电子传递体系活性而言,其毒性顺序为: $\text{Hg}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ag}^+ > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$,INT-电子传递体系活性的顺

序则为: $\text{Hg}^{2+} > \text{Ag}^+ > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$.

(2)各种重金属抑制 TTC-电子传递体系活性的 IC_{50} 小于抑制 INT-电子传递体系活性的 IC_{50} ,说明在用 TTC-电子传递体系活性来表征重金属对污泥活性的影响时,其灵敏性高于 INT-电子传递体系

活性.

参考文献:

- [1] Blenkinsopp S A, Lock M A. The measurement of electron transport system activity in river biofilms[J]. Wat. Res., 1990, 24(4): 441~445.
- [2] Lopez J M, Koopman B, Bitton G. INT-dehydrogenase test for activated sludge process control[J]. Biotechnol. Bioeng., 1986, 28: 1080~1085.
- [3] Anderson K, Koopman B, Bitton G. Evaluation of INT-dehydrogenase assay for heavy metal inhibition of activated sludge[J]. Wat. Res., 1988, 22(3): 349~353.
- [4] Tabor P S, Neihof R A. Improved method for determination of respiring individual microorganisms in natural waters[J]. Appl. Environ. Microbiol., 1982, 43(6): 1249~1255.
- [5] Klapwijk A, Drent J, Steenvoorden J H A M. A modified procedure for the TTC-dehydrogenase test in activated-sludge[J]. Wat. Res., 1974, 8: 121~125.
- [6] Nachlas M M, Margulies S I, Seligman A M. Sites of electron transfer to tetrazolium salts in the succinoxidase system[J]. J. Biol. Chem., 1960, 235(9): 2739~2743.
- [7] Ryssov-Nielsen H. Measurement of inhibition of respiration in activated sludge by a modified determination of the TTC-dehydrogenase activity[J]. Wat. Res., 1975, 9: 1179~1185.
- [8] Trevors J T. Electron transport system activity in soil, sediment and pure cultures[J]. CRC Crit. Rev. Microbiol., 1984, 11: 83~100.
- [9] 沈同,王镜岩.生物化学(上册)[M].北京:高等教育出版社,1990.256~262.
- [10] 任南琪,马放.污染控制微生物学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.170~171.
- [11] 孟祥和,胡国飞.重金属废水处理[M].北京:化学工业出版社,2000.5~16.
- [12] Dutka B J, Nyholm N, Petersen J. Comparison of several microbiological toxicity screen tests[J]. Wat. Res., 1983, 17(10): 1363~1368.
- [13] Jørgensen K P. Determination of the enzyme activity of activated sludge by methylene blue reduction[J]. J. Wat. Pollut. Control Fed., 1984, 56(1): 89~93.
- [14] 徐镜波.环境毒理学[M].长春:东北师范大学出版社,2000.314~316.
- [15] Brezonik P, Patterson J W. Activated sludge ATP: effects of environmental stress[J]. J. sanit. Engng Div. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., 1971, 97: 813~824.
- [16] Cenci G, Morozzi G. The validity of the TTC-test for dehydrogenase activity of activated sludges in the presence of chemical inhibitors[J]. Zentbl. Bakt. Hyg. I. Abt. Orig. B., 1979, 169: 320~330.
- [17] King E F, Painter H A. Inhibition of respiration of activated sludge: variability and reproducibility of results[J]. Toxicity Assess., 1986, 1(1): 27~39.

化学工业出版社新书推介

《工业水污染控制》(原著第三版)(2004年5月出版,38.00元)

艾肯费尔德教授所著的《工业水污染控制》一书,一直深受美国和其他国家环境工程教育界的喜爱.本书根据水质控制标准的新要求和处理技术的新发展几经修订,现已出版了第三版,其内容包括:工业废水的来源与特性;废水处理过程;预处理及初级处理;混凝、沉淀、金属去除;曝气与质量转移;好氧生物处理原理;废水处理的生物方法;吸附;离子交换;化学氧化;污泥的处理与处置;其他处理方法.

本书在阐述各种物理、化学和生物处理基本原理的同时,强调了如何把这些原理应用于解决各种实际工业水污染问题的处理设计中,全书各章含有大量的实例和图表,为读者提供了比较完整的理论和应用指导;书中还推荐了各种参考文献.

《环境物理学》(2004年10月出版,34.00元)

本书是作者多年来研究土壤-植被-大气系统环境物理过程的概括总结.主要内容包括:环境物理学的基本知识、基本理论以及环境物理学的发展方向;土壤环境物理、植被环境物理、植被冠层中的辐射传输、土壤-植被-大气系统环境物理过程及其模型、遥感环境物理学、陆面物理过程及局地气候效应的预测模型等.

《分散式污水处理和再利用——概念、系统和实施》(2004年5月出版,58.00元)

本书原著是国际水协会(IWA)2001年出版的《环境技术丛书》中的一部,中文版的出版得到了“国外优秀科技著作出版专项基金”的资助.作者从可持续发展的角度,对现代卫生工程技术进行了批判性的论述,提出了将城市废物与污水综合处理的方法,还强调了要考虑与卫生事业相关的建筑、城市规划和社会经济等问题.书中大量介绍了国外在分散式污水处理和再利用领域的主要和最新成果,涉及社会学、经济学,尤其是环境与公共卫生学问题,对于解决目前我国的水污染问题,推进污水资源化战略有很高的参考价值.

《环境污染化学》(2004年3月出版,38.00元)

本书主要从天然环境和污染环境两方面论述了大气、水体和土壤中的环境污染化学机理及其污染防治技术.在天然环境中,主要论述化学污染(含微生物污染)的分类、结构、物理性质和化学性质;在污染环境中,主要讨论污染物(含微生物污染)的来源、分布、物理性质、生态性质和污染控制化学原理.

以上图书全国各大书店均有售,如需获取更多图书信息,欢迎登录 www.cip.com.cn 查询,邮购加收10%邮费.

地址:(100029)北京市朝阳区惠新里3号;收款人:化学工业出版社发行部;邮购电话:010-64918013,64982530.