

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.005

# 钙镁对渗滤液处理中微生物电子传递体系的影响

张 华<sup>1,2</sup>, 曹雪枫<sup>1,2</sup>, 黄 健<sup>1,2</sup>, 陶海涛<sup>1,2</sup>, 贾 旋<sup>1,2</sup>,  
王金花<sup>1,2</sup>, 奚珊珊<sup>1,2</sup>

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 环境污染控制与废弃物  
资源化利用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

**摘 要:** 垃圾渗滤液中普遍存在的高浓度钙、镁离子会对微生物生长代谢产生抑制作用,而电子传递体系在微生物代谢过程中发挥着重要作用,因此,采用直接均分射线法设计3种不同钙离子和镁离子配比( $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ),采用 Logistic 和 BiPhasic 型曲线对浓度-效应数据进行拟合,并绘制浓度-效应曲线,利用等效线图法分析钙、镁离子对垃圾渗滤液处理中厌氧微生物电子传递体系的影响。结果表明,钙离子单独作用及钙、镁离子混合作用对厌氧微生物电子传递体系活性均表现为低浓度促进、高浓度抑制的特点,促进作用随钙、镁离子浓度的增加而减小,而抑制作用则随钙、镁离子浓度及作用时间的增加而增大。等效线图模型分析表明,当钙、镁离子配比为 $L_1$ 和 $L_2$ 时,随着作用时间的增加,钙、镁离子对厌氧微生物电子传递体系的作用关系由拮抗作用过渡到部分加和作用,最终转变为协同作用;当钙、镁离子配比为 $L_3$ 时,钙、镁离子对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为协同作用。

**关键词:** 垃圾渗滤液; 钙离子; 镁离子; 厌氧微生物; 电子传递体系

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0025-07

## Effect of Calcium and Magnesium Ions on Microbial Electron Transport System in Landfill Leachate Treatment

ZHANG Hua<sup>1,2</sup>, CAO Xue-feng<sup>1,2</sup>, HUANG Jian<sup>1,2</sup>, TAO Hai-tao<sup>1,2</sup>, JIA Xuan<sup>1,2</sup>,  
WANG Jin-hua<sup>1,2</sup>, XI Shan-shan<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Reuse, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The high concentration of calcium and magnesium ions in landfill leachate can inhibit the growth and metabolism of microorganisms, and the electron transport system plays an important role in the metabolic process of microorganisms. Therefore, three different calcium and magnesium ion ratios ( $L_1$ ,  $L_2$  and  $L_3$ ) were designed by direct uniform beam method. Logistic and BiPhasic curves were employed to fit the concentration-effect data and draw the concentration-effect curve. The effect of calcium and

基金项目: 安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2019ZD52、KJ2020A0466); 安徽省自然科学基金资助面上项目(1908085ME142、1808085MB34); 国家重点研发计划项目(2019YFC0408504); 安徽建筑大学引进人才及博士启动基金资助项目(2019QDZ64、2019QDZ60)

通信作者: 黄健 E-mail: huangjianpaper@163.com

magnesium ions on the electron transport system of anaerobic microorganisms in landfill leachate treatment was analyzed by isobologram method. The effects of calcium ion alone and calcium and magnesium ions together on the activity of anaerobic microbial electron transport system were characterized by low concentration promoting and high concentration inhibiting. The promoting effect decreased with the increase of calcium and magnesium ion concentration, while the inhibiting effect increased with the increase of calcium and magnesium ion concentration and action time. The isobologram model analysis showed that, when the ratios of calcium and magnesium ions were  $L_1$  and  $L_2$ , the effect of calcium and magnesium ions on the anaerobic microbial electron transport system was transformed from antagonism to partial adding effect and eventually to synergy with the increase of action time. When the ratio of calcium and magnesium ions was  $L_3$ , the effect of calcium and magnesium ions on the electron transport system was synergistic.

**Key words:** landfill leachate; calcium ion; magnesium ion; anaerobic microorganism; electron transport system

电子传递体系广泛存在于动植物体内及微生物细胞中,其通过接受电子体释放的电子氢并将基质脱下的电子传递给最终电子受体,同时伴随着腺嘌呤核苷三磷酸的生成,进而为微生物生长代谢提供足够的能量,在微生物生长代谢过程中起着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。微生物电子传递体系主要由脱氢酶组成,当微生物受到外界环境胁迫时脱氢酶活性受到影响,从而使微生物电子传递体系的活性遭到破坏,进而影响微生物正常的生长代谢<sup>[1,3-5]</sup>。因此,研究污染物对微生物电子传递体系活性的影响具有重要意义。不同污染物对微生物电子传递体系活性产生的影响不同,并且微生物电子传递体系活性随着污染物浓度的变化而变化<sup>[6-7]</sup>。然而,目前研究主要集中在单一污染物对微生物电子传递体系的影响,较少有混合污染物的影响研究,而环境中的污染物大多是以混合物的形式存在,混合污染物的影响更复杂,因此,具有更重要的研究意义。

垃圾渗滤液中普遍存在钙、镁离子,浓度为几十到数千 mg/L<sup>[8-9]</sup>。但钙、镁离子对垃圾渗滤液厌氧生物处理过程中微生物电子传递体系的影响研究较少。鉴于此,笔者首先研究了单独钙离子和镁离子对垃圾渗滤液处理过程中厌氧微生物电子传递体系的影响,然后重点研究了钙、镁离子的联合作用。首先采用直接均分射线法<sup>[10]</sup>设计3种不同浓度配比的钙、镁离子混合物,分别采用非线性回归方法S型、J型曲线<sup>[11]</sup>对浓度-效应数据进行拟合,并绘制浓度-效应曲线;利用等效线图法<sup>[12]</sup>分析钙、镁

离子混合物对微生物电子传递体系的联合作用,进而全面系统地分析不同浓度钙、镁离子对微生物电子传递体系的影响,以期垃圾渗滤液生物处理中钙、镁离子的影响提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设置及种泥来源

试验中的垃圾渗滤液及种泥均取自合肥市某垃圾渗滤液处理厂。试验设置不同浓度梯度的钙离子、镁离子和两者混合物的厌氧序批式活性污泥反应器,反应器有效容积为500 mL,直径为8 cm,高为12 cm,试验装置如图1所示。反应器水力停留时间为36 h,其中进水1 h、反应34.6 h、沉淀0.2 h、出水0.2 h。振荡频率为140 r/min,试验温度维持在35℃左右。钙、镁离子采用电感耦合等离子体发射光谱法检测。电子传递体系活性采用碘硝基氯化四氮唑蓝作为电子受体进行测定<sup>[13]</sup>。

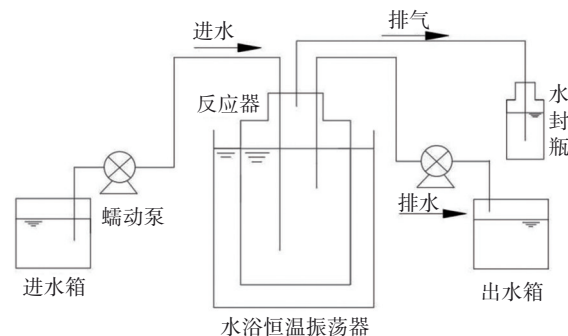


图1 试验装置示意

Fig.1 Test device for landfill leachate treatment

## 1.2 污染物抑制率及作用效应分析

向反应器中投加不同浓度的钙、镁离子及其混合物,待反应器稳定后,分别检测其电子传递体系活性,计算不同浓度钙离子、镁离子及其混合物对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制率 $X$ ,如下:

$$X = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (1)$$

式中: $C_0$ 为空白对照组的厌氧微生物电子传递体系活性, $\mu\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ;  $C$ 为不同浓度钙离子、镁离子及其混合物影响下厌氧微生物电子传递体系活性, $\mu\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ 。

采用 BiPhasic 函数拟合 J 型浓度-效应试验数据<sup>[11]</sup>。BiPhasic 函数如下:

$$X = B_{\min} + \frac{B_{\max 1} - B_{\min}}{1 + 10^{(c - c_{01}) \times d_1}} + \frac{B_{\max 2} - B_{\min}}{1 + 10^{(c_{02} - c) \times d_2}} \quad (2)$$

式中: $c$ 为钙离子、镁离子或两者混合物浓度, $\text{mg}/\text{L}$ ;  $c_{01}$ 、 $c_{02}$ 为钙离子、镁离子或两者混合物的半数有效浓度  $\text{EC}_{50}$ ,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $B_{\min}$ 为最低抑制率(即浓度-效应曲线的最低点,也是最大促进效应点);  $B_{\max 1}$ 为达到  $B_{\min}$  之前的最高抑制率;  $B_{\max 2}$ 为达到  $B_{\min}$  之后的最高抑制率;  $d_1$ 、 $d_2$ 为斜率。

采用 Logistic 函数拟合 S 型浓度-效应试验数据<sup>[11]</sup>。Logistic 函数如下:

$$X = \frac{A_{\max} - A_0}{1 + (c/c_0)^\alpha} + A_0 \quad (3)$$

式中: $A_{\max}$ 为不同浓度下钙离子、镁离子或两者混合物对厌氧微生物电子传递体系活性的最大抑制率;  $A_0$ 为空白对照组的抑制率;  $\alpha$ 为钙离子、镁离子或两者混合物的潜在抑制能力常数;  $c$ 为钙离子、镁离子或两者混合物的浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $c_0$ 为钙离子、镁离子或两者混合物的半数有效浓度  $\text{EC}_{50}$ ,  $\text{mg}/\text{L}$ 。

## 1.3 钙、镁离子浓度设计

为了研究钙、镁离子二元混合物的联合作用效应,先采用直接均分射线法构建钙离子和镁离子二元混合体系,如图 2 所示。钙、镁离子设置 3 种配比:当钙、镁离子配比为  $L_1$  时,钙、镁离子的占比分别为 0.27 和 0.73;当钙、镁离子配比为  $L_2$  时,钙、镁离子占比分别为 0.52 和 0.48;当钙、镁离子配比为  $L_3$  时,钙、镁离子占比分别为 0.77 和 0.23。再采用稀释因子法确定不同配比下不同浓度组合的钙、镁离子混合物,其中稀释因子的确定方法如下:

$$W = \left( \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (4)$$

式中: $W$ 为稀释因子;  $P_{\min}$ 为最低浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $P_{\max}$ 为最高浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $n$ 为浓度点个数。

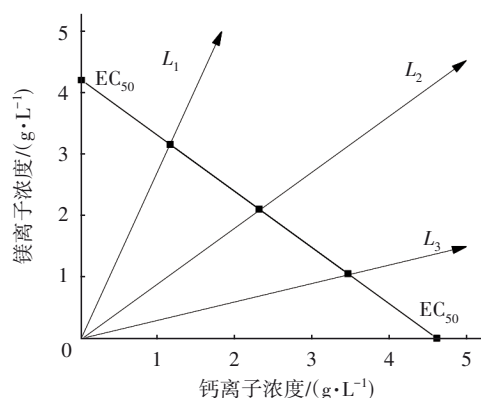


图2 直接均分射线法设计3种钙、镁离子混合物配比

Fig.2 Three mixtures of calcium and magnesium ions designed by direct equipartition ray method

## 1.4 钙、镁离子混合物作用关系分析

该试验采用等效线图法分析不同浓度配比的钙、镁离子对垃圾渗滤液处理过程中厌氧微生物电子传递体系的作用关系。等效线图法如图 3 所示。A、B 分别表示钙、镁离子在单独作用条件下达到某一相同作用效应时对应的浓度值,连接点 A 和点 B,形成的线段 AB 称为加和作用线,该线段表示钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为加和作用。白色区域表示钙、镁离子对电子传递体系的作用关系为拮抗作用;蓝色区域表示钙、镁离子对电子传递体系的作用关系为部分加和作用;黄色区域表示钙、镁离子对电子传递体系的作用关系为协同作用。

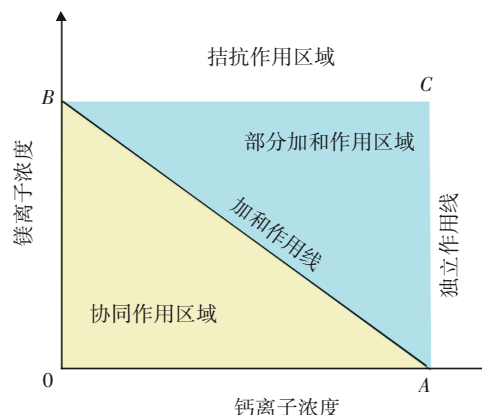


图3 等效线图法示意

Fig.3 Diagram of isobologram method

## 2 结果与讨论

### 2.1 钙离子对微生物电子传递体系的影响

不同浓度钙离子对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用随时间的变化如图4所示。可知,不同周期条件下,不同浓度钙离子对厌氧微生物电子传递体系的浓度-效应曲线形状均为J型,而且钙离子对厌氧微生物电子传递体系活性的促进和抑制作用的转折点浓度为687 mg/L。当钙离子浓度<687 mg/L时,随着反应的进行,对厌氧微生物电子传递体系活性有一定的促进作用,促进效应最高达到14.7%;当钙离子浓度>687 mg/L时,随着钙离子浓度的增加,对厌氧微生物电子传递体系活性的促进作用逐渐降低并向抑制作用转变,而且随着反应周期的增加,钙离子对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用逐渐增强;当钙离子浓度达到8 000 mg/L时,对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制率达到了77%左右。以上说明,低浓度的钙离子对厌氧微生物电子传递体系活性具有促进作用,而高浓度的钙离子对厌氧微生物电子传递体系活性具有抑制作用,并且随着钙离子浓度和作用时间的增加,抑制作用也逐渐增强。

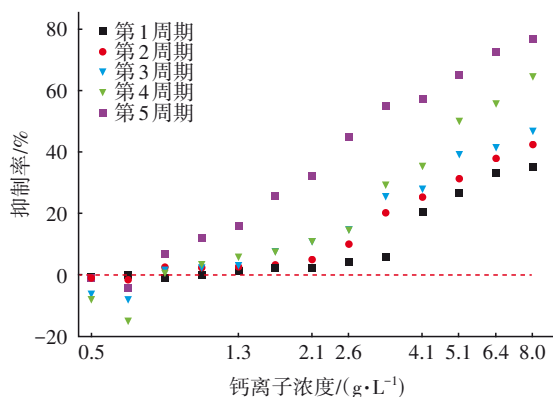


图4 不同周期条件下不同浓度钙离子对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用

Fig.4 Inhibition of different concentrations of calcium ions on the activity of electron transport system in different cycles

### 2.2 镁离子对微生物电子传递体系的影响

不同浓度镁离子对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用随时间的变化见图5。镁离子对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用具有明显的时间依赖性,表现为在一定浓度条件下,抑制作用随着暴露时间的延长而逐渐增强。另外,当镁离

子浓度在549~8 000 mg/L时,厌氧微生物电子传递体系活性受到的抑制作用随镁离子浓度的增加而显著增强,当镁离子浓度为8 000 mg/L时,抑制率达到了81.4%,说明高浓度的镁离子对厌氧微生物电子传递体系的抑制作用具有明显的浓度依赖性。

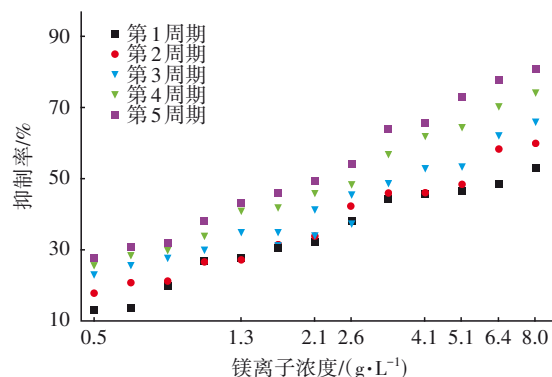


图5 不同周期条件下不同浓度镁离子对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用

Fig.5 Inhibition of different concentrations of magnesium ions on the activity of electron transport system in different cycles

### 2.3 钙、镁离子对微生物电子传递体系的影响

不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用随时间的变化见图6。可知,3种不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的浓度-效应曲线均呈现J型曲线。在钙、镁离子配比为 $L_1$ 的条件下,当钙、镁离子混合物浓度<549 mg/L时,对厌氧微生物电子传递体系的抑制作用随着浓度的增加而逐渐降低;当钙、镁离子混合物浓度>549 mg/L时,对厌氧微生物电子传递体系的抑制作用随着浓度的增加而逐渐升高。在钙、镁离子配比为 $L_2$ 和 $L_3$ 的条件下,当钙、镁离子混合物浓度<687 mg/L时,对厌氧微生物电子传递体系的抑制作用随着浓度的增加而逐渐降低;当钙、镁离子混合物浓度>687 mg/L时,对厌氧微生物电子传递体系的抑制作用随着浓度的增加而逐渐升高。不同配比的钙、镁离子混合物在相同浓度条件下,随着作用时间的延长,对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用逐渐增强。这说明不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系活性的作用效应既具有浓度依赖性又具有时间依赖性。综上,不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系活性均表现出低浓度促进、高浓度抑制的作用,并且促进作



用随着钙离子占比的增加而逐渐降低。

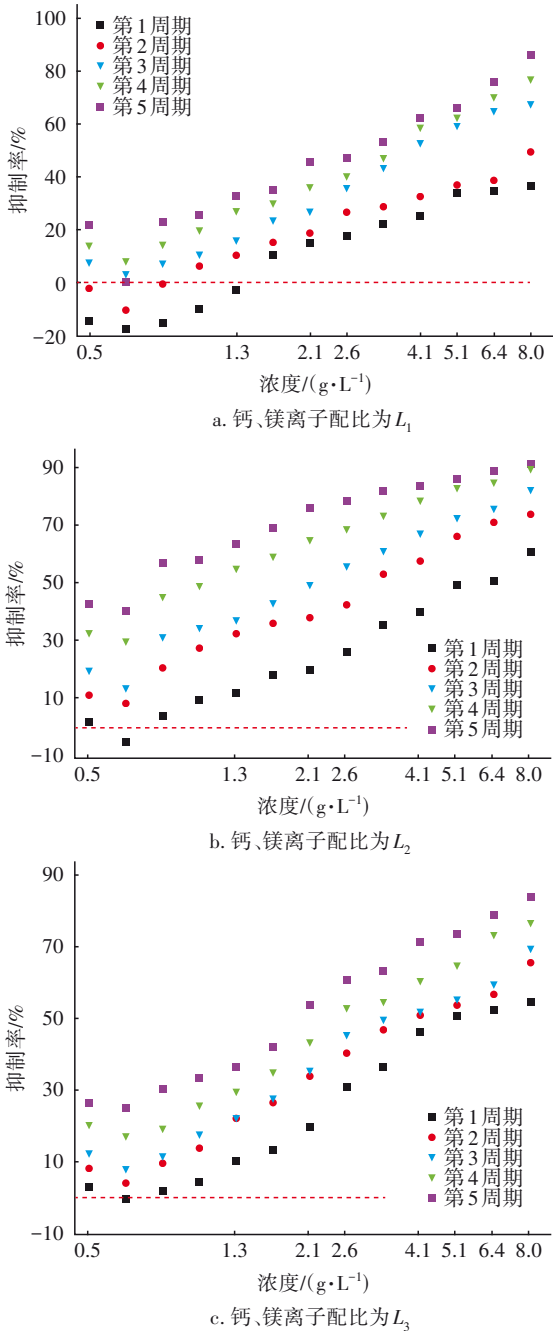


图6 不同周期条件下不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系活性的抑制作用

Fig.6 Inhibition of different concentration ratios of calcium and magnesium ions on the activity of electron transport system in different cycles

## 2.4 钙、镁离子与电子传递体系的作用关系

采用等效线图法分析不同周期下不同浓度配比钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系,结果如图7所示。

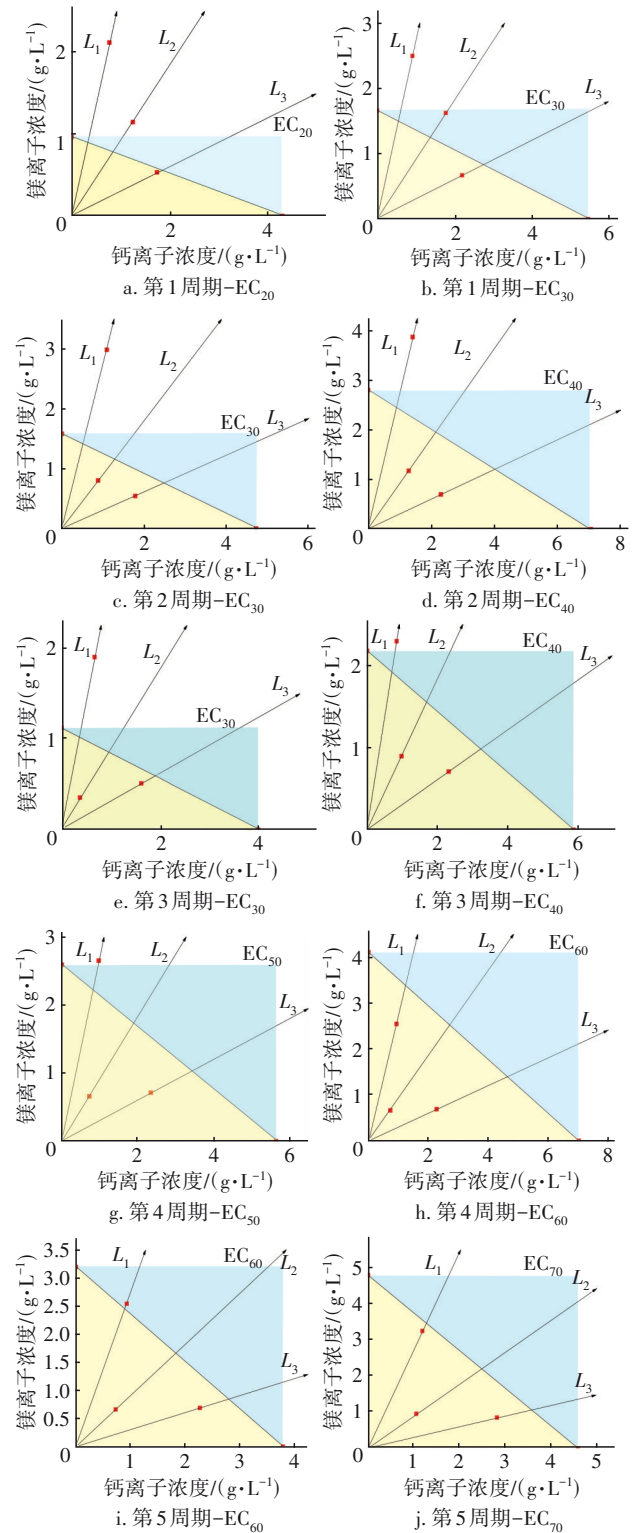


图7 不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系

Fig.7 Effect and interaction relationship of different concentration ratios of calcium and magnesium ions on the electron transport system

当反应器运行到第1周期时,可画出 $EC_{20}$ 和 $EC_{30}$ 效应浓度水平下的等效线图。由图7(a)、(b)可知,在第1周期,当钙、镁离子配比为 $L_1$ 时,钙、镁离子的浓度点均落在白色区域,表明钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为拮抗作用;当钙、镁离子配比为 $L_2$ 时,钙、镁离子的浓度点由白色区域逐渐过渡到蓝色区域,表明钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系由拮抗作用逐渐转变为部分加和作用;当钙、镁离子配比为 $L_3$ 时,钙、镁离子的浓度点均落在黄色区域,表明钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为协同作用。

当反应器运行到第2~3周期时,可画出 $EC_{30}$ 和 $EC_{40}$ 效应浓度水平下的等效线图。由图7(c)~(f)可知,在第2~3周期,当钙、镁离子配比为 $L_2$ 和 $L_3$ 时,钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为协同作用;当钙、镁离子配比为 $L_1$ 时,钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为拮抗作用。

当反应器运行到第4周期时,可画出 $EC_{50}$ 和 $EC_{60}$ 效应浓度水平下的等效线图。由图7(g)和(h)可知,在第4周期,当钙、镁离子配比为 $L_1$ 时,钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系由拮抗作用转变为协同作用;当钙、镁离子配比为 $L_2$ 和 $L_3$ 时,钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为协同作用。

当反应器运行到第5周期时,可画出 $EC_{60}$ 和 $EC_{70}$ 效应浓度水平下的等效线图。由图7(i)和(j)可知,在第5周期,当钙、镁离子配比为 $L_1$ 时,钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系由部分加和作用转变为协同作用;当钙、镁离子配比为 $L_2$ 和 $L_3$ 时,钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系为协同作用。

综上所述,钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用关系随着两者配比的不同而发生变化。微生物电子传递体系主要由脱氢酶组成,在微生物代谢过程中,基质脱氢是生物进行氧化分解的关键步骤,在微生物降解有机污染物的过程中发挥着重要作用,微生物脱氢酶活性易受外界环境的影响,进而影响电子传递体系的活性<sup>[14]</sup>。当钙、镁离子混合物配比为 $L_1$ 时,镁离子占比较高,钙离子占比较低,较高的镁离子可能会阻碍钙离子与脱

氢酶结合,而钙离子在低浓度条件下对脱氢酶活性具有促进作用,会削弱镁离子对脱氢酶的抑制作用,因此,当钙、镁离子混合物配比为 $L_1$ 时,钙、镁离子混合物对微生物电子传递体系的作用关系主要表现为拮抗作用<sup>[3,15-16]</sup>。当钙、镁离子浓度配比为 $L_3$ 时,钙离子起主导作用,高浓度的钙、镁离子均会对脱氢酶产生抑制作用,进而影响微生物电子传递体系活性,因此,当钙、镁离子浓度配比为 $L_3$ 时,钙、镁离子混合物对微生物电子传递体系表现的作用关系主要为协同作用。不同配比钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用机制有待进一步研究。

### 3 结论

① 钙离子对厌氧微生物电子传递体系的作用呈现低浓度促进、高浓度抑制的特点;而镁离子对厌氧微生物电子传递体系的作用均为抑制。在同一浓度条件下,钙离子或镁离子对厌氧微生物电子传递体系的抑制作用随作用时间的增加而逐渐升高。

② 不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系的作用效应均具有浓度依赖性和时间依赖性。不同浓度配比的钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系均表现出低浓度促进作用,但是该促进作用随着钙离子占比的增加而逐渐降低;而高浓度钙、镁离子混合物对厌氧微生物电子传递体系具有抑制作用。随着作用时间的增加,促进作用逐渐降低,抑制作用逐渐升高。

### 参考文献:

- [1] WANG S Q, QIU L, LIU X W, *et al.* Electron transport chains in organohalide-respiring bacteria and bioremediation implications [J]. *Biotechnology Advances*, 2018, 36(4): 1194-1206.
- [2] LIU C, REN L H, YAN B H, *et al.* Electron transfer and mechanism of energy production among syntrophic bacteria during acidogenic fermentation: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 323: 124637.
- [3] SU X X, CHEN Y, WANG Y Y, *et al.* Disturbances of electron production, transport and utilization caused by chlorothalonil are responsible for the deterioration of soil denitrification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134: 100-107.
- [4] CHEN Y W, WANG L, DAI F Z, *et al.* Biostimulants

- application for bacterial metabolic activity promotion and sodium dodecyl sulfate degradation under copper stress [J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 736–743.
- [ 5 ] GUO H X, CHEN Z, LU C C, *et al.* Effect and ameliorative mechanisms of polyoxometalates on the denitrification under sulfonamide antibiotics stress [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 305: 123073.
- [ 6 ] 陈皓, 陈玲, 赵建夫, 等. 重金属对厌氧污泥电子传递体系活性影响研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 786–790.
- CHEN Hao, CHEN Ling, ZHAO Jianfu, *et al.* Effects of heavy metallic ions on electron transport system activity of anaerobic sludge[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 786–790 (in Chinese).
- [ 7 ] MA B R, LI Z W, WANG S, *et al.* Insights into the effect of nickel Ni( II ) on the performance, microbial enzymatic activity and extracellular polymeric substances of activated sludge [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 81–89.
- [ 8 ] NAVEEN B P, MAHAPATRA D M, SITHARAM T G, *et al.* Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 1–12.
- [ 9 ] 刘珊, 樊升光, 孙朝辉, 等. 垃圾渗滤液不同处理阶段金属离子含量分析研究[J]. *应用化工*, 2018, 47(6): 1304–1307.
- LIU Shan, FAN Shengguang, SUN Zhaohui, *et al.* Analysis of metal ion content in different treatment stages of landfill leachate [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(6): 1304–1307 (in Chinese).
- [10] ZHANG Y H, LIU S S, LIU H L, *et al.* Evaluation of the combined toxicity of 15 pesticides by uniform design [J]. *Pest Management Science*, 2010, 66 (8) : 879–887.
- [11] WANG Z J, LIU S S, QU R. JSFit: a method for the fitting and prediction of J- and S-shaped concentration-response curves [J]. *RSC Advances*, 2018, 8 (12) : 6572–6580.
- [12] ZHAO F, LI Y F, HUANG L L, *et al.* Individual and combined toxicity of atrazine, butachlor, halosulfuron-methyl and mesotrione on the microalga *Selenastrum capricornutum* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 969–975.
- [13] 尹军, 谭学军, 任南琪. 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[J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 56–62.
- YIN Jun, TAN Xuejun, REN Nanqi. Evaluation of TTC and INT-electron transport system activity tests for heavy metal inhibition of activated sludge [J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 56–62 (in Chinese).
- [14] 李静, 严红, 肖本益. 活性污泥活性的表征及其检测方法研究[J]. *工业水处理*, 2016, 36(8): 5–10.
- LI Jing, YAN Hong, XIAO Benyi. Research on the characterization and detection methods for the activity of activated sludge[J]. *Industrial Water Treatment*, 2016, 36(8): 5–10 (in Chinese).
- [15] VOMA C, BARFELL A, CRONIGER C, *et al.* Reduced cellular  $Mg^{2+}$  content enhances hexose 6-phosphate dehydrogenase activity and expression in HepG2 and HL-60 cells [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2014, 548: 11–19.
- [16] WAN R, CHEN Y G, ZHENG X, *et al.* Effect of  $CO_2$  on NADH production of denitrifying microbes via inhibiting carbon source transport and its metabolism [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 896–904.

作者简介:张华(1978– ),女,安徽界首人,博士,教授,主要从事水处理理论与技术教学及科研工作。

E-mail:zhanghuapaper@163.com

收稿日期:2021-03-24

修回日期:2021-07-05

(编辑:刘贵春)