

硫酸盐还原菌及其还原解毒 Cr(VI)的研究进展

徐卫华* 刘云国 曾光明 李欣 彭庆庆

(湖南大学环境科学与工程学院 湖南 长沙 410082)

摘要: 硫酸盐还原菌是一类分布广泛,能进行硫酸盐异化还原反应的严格厌氧菌。利用硫酸盐还原菌可去除环境中的许多污染物,因而该类细菌在环境污染治理中具有广阔的应用前景。本文介绍了硫酸盐还原菌的生物学特性和代谢特征及其在环境污染治理中的应用,并对硫酸盐还原菌还原解毒 Cr(VI)及应用于含 Cr(VI)废水处理的研究进展作了综述,分析了其未来的研究方向。

关键词: 硫酸盐还原菌, Cr(VI), 还原

Sulfate-reducing Bacteria and Research Progress of Cr(VI) Reduction by Sulfate-reducing Bacteria

XU Wei-Hua* LIU Yun-Guo ZENG Guang-Ming LI Xin PENG Qing-Qing

(College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Sulfate-reducing bacteria (SRB) are widespread in the environment. SRB are obligate anaerobes and capable of dissimilatory reduction of sulfate. SRB have application prospects in the control of environmental pollution due to that many pollutants can be removed by SRB. The biological characteristics and metabolic mechanisms of SRB are introduced, and the application of SRB in the treatment of environmental pollution is described in this paper. The research progress of Cr(VI) reduction and Cr(VI) removal from wastewater by SRB is reviewed, and future direction of research on the control of Cr(VI) pollution by SRB is also analysed.

Keywords: Sulfate-reducing bacteria, Cr(VI), Reduction

硫酸盐还原菌(Sulfate-reducing bacteria, 简称 SRB)是对能进行硫酸盐异化还原反应的细菌的通称。人们对 SRB 的重视,是缘于它们所参与的微生物腐蚀。在研究 SRB 腐蚀特性的同时,人们也逐渐认识到其在环境污染治理中的作用,并对 SRB 生物处理酸性矿山废水、重金属废水和有机废水等进行了大量的研究和报道。铬()是毒性极强的一种重金属,在许多国家被列为优先污染物。Cr()在工业中被广泛应用,大量含 Cr()废水排放,对环境造

成严重污染。近年来,采用微生物法处理含 Cr()废水逐渐被认可,SRB 也因对废水中的 Cr()具有良好的去除效果而受到关注。

1 硫酸盐还原菌的特性

SRB 是一类形态各异、营养类型多样、能利用硫酸盐或其他氧化态硫化物作为电子受体来异化有机物质的严格厌氧菌。SRB 有极强的生命力,即使在污染严重的环境中也能生存,故这类细菌在自然

* 通讯作者: Tel: 86-731-8822829; E-mail: amywei huaxu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-11-13; 接受日期: 2009-02-10

环境中分布广泛, 对环境中许多物质的迁移和转化有着重要影响。

1.1 硫酸盐还原菌的分类及生物学特性

在Bergey's细菌分类手册中, 按SRB对有机物利用性能不同, 将其分为 8 个属^[1]: *Desulfovibrio*、*Desulfomonas*、*Desulfobulbus*、*Desulfotomaculum*、*Desulfococcus*、*Desulfobacter*、*Desulfosarcina*、*Desulfonema*。目前已知的SRB有 40 多个种, 根据生理生化特性、营养代谢产物, 可以对其进行分类^[2]。根据不同的生理生化特性, 可以分为异化硫酸盐还原菌和异化硫还原菌: 前者利用乳酸盐、丙酮酸盐、乙醇和 H_2 等作为碳源和能源, 还原硫酸盐生成硫化物; 后者只能还原元素硫或者其他含硫化合物(如亚硫酸盐、硫代硫酸盐等)。根据营养代谢产物不同, SRB可分为完全氧化型和不完全氧化型: 完全氧化型最终代谢产物为 CO_2 和 H_2O ; 不完全氧化型最终产物为乙酸, 这类SRB不能利用乙酸。

SRB 能利用种类繁多的基质作为有机碳源和电子供体, 迄今发现可支持其生长的基质超过 100 种, 其中包括乳酸盐、丙酸盐、反丁烯二酸、苹果酸、乙醇等。SRB 还原作用受到许多环境因子的影响^[2,3]。pH是影响SRB活力的主要因素, SRB生长最适pH一般在中性范围。温度也是影响SRB还原效果的一个重要因子, 不同的SRB, 其发挥还原作用的最佳温度也不同。SRB对 H_2S 的毒性影响也较为敏感, H_2S 的浓度达到一定程度, 会抑制SRB的生长, 当毒性水平持续一定时间, SRB的活性会不可逆的丧失。此外, 基质碳源的种类、有毒重金属等也会影响SRB的生长和还原速率。

1.2 硫酸盐还原菌的代谢机理

SRB的代谢过程一般可分为 3 个阶段^[3]: 分解代谢、电子传递、氧化(图 1)。

在第 1 阶段的分解代谢中, SRB在厌氧条件下对碳源(有机物)进行降解, 并产生少量ATP和高能电子; 在第 2 阶段中, 前一阶段释放的高能电子通过SRB特有的电子传递链(黄素蛋白、细胞色素 C_3 等)逐级传递, 产生大量ATP; 在最后阶段中, 电子被传递给氧化态的硫元素, 并将其还原为 S^{2-} 。从这一过程可以看出, 硫酸盐仅在其中起最终电子受体的作用, 而有机物既是SRB的碳源, 起着电子供体的作用, 也是SRB生长代谢的能源。

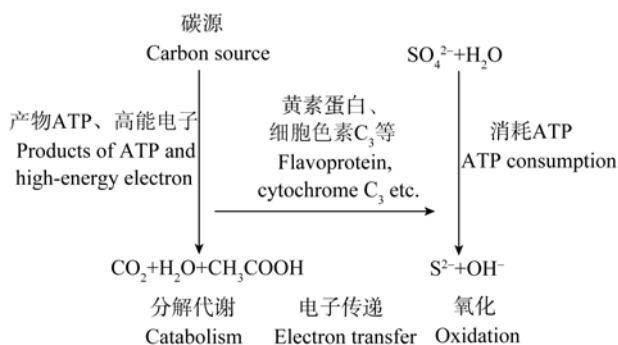


图 1 硫酸盐还原菌的分解代谢过程

Fig. 1 Metabolic process in sulfate-reducing bacteria

1.3 硫酸盐还原菌在环境污染治理中的应用

利用SRB处理含重金属废水和酸性矿山废水是SRB在环境污染治理中应用的两个重要方面。在厌氧条件下, SRB通过异化还原作用将 SO_4^{2-} 还原为 H_2S 。废水中的重金属离子可以和 H_2S 反应生成溶解度很低的金属硫化物沉淀, 从而去除废水中的重金属^[4]。苏冰琴和李亚新^[5]采用厌氧膨胀颗粒污泥床反应器研究SRB对含硫酸盐和重金属 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 废水的生物处理效果, 发现 SO_4^{2-} 生物还原生成 H_2S , 可有效的促进重金属转化为稳定的硫化物沉淀形态, Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的最大去除率可分别达到 95.3%, 93.1%, 98.2%, 89.9%, 95.6%。Jong和Parry^[6]研究上流式厌氧反应器中SRB混合菌群对废水中 SO_4^{2-} 和重金属离子的去除效果时, 发现Cu、Zn、Ni的去除率达到 97.5%以上。除利用SRB还原 SO_4^{2-} 生成难溶的金属硫化物去除重金属离子外, 还可利用SRB产生的胞外聚合物吸附去除废水中的重金属离子^[7]。

另一方面, SRB在酸性矿山废水治理中也具有重要的应用价值。在SRB的作用下, 酸性矿山废水中的 SO_4^{2-} 被还原为 H_2S 并进一步通过生物氧化作用将 H_2S 氧化为单质硫。对于含重金属的酸性矿山废水, SRB不仅可还原去除废水中高浓度的硫酸盐, 还可同时去除其中的重金属离子^[8,9]。自上世纪 70 年代起, 国内外的相关学者就对硫酸盐的生物还原进行了大量研究。Wei等^[10]报道纳米和亚微米电气石对SRB还原硫酸盐有促进作用, 这是因为纳米和亚微米电气石能促进SRB生长, 提高SRB的数量和酶活性。Kosińska和Miśkiewicz^[11]研究了连续性厌氧生物反应器对废水中硫酸盐的去除, 发现向反应器中循环补充SRB时, 硫酸盐和COD的去除率分别达到

98%、88%。Chockalingam和Subramanian^[12]采用细叶桉(*Eucalyptus tereticornis*)的树根对酸性矿山废水进行预处理,再用硫酸盐还原菌*Desulfotomaculum nigrificans*进行处理,硫酸盐的去除率在pH为4.1和5.5时可分别达到75%、84%以上。李亚新和苏冰琴^[13]以生活垃圾发酵产物为碳源,采用以陶粒为填料的上向流厌氧填充床生物反应器进行了SRB处理酸性矿山废水的小试研究, SO_4^{2-} 的还原率可达到87%。

此外,SRB还可用于烟气脱硫和燃料脱硫中。Lee和Sublette^[14]研究发现,脱硫弧菌与异养型发酵细菌在pH 7.0,温度25℃下混合培养,脱硫弧菌与 SO_2 仅接触1 s~2 s内, SO_2 完全转化为 H_2S 。

2 硫酸盐还原菌还原解毒Cr(VI)的研究

虽然SRB早在1895年被发现,至今已有一百多年的历史,其对硫酸盐等物质的还原作用也早已得到人们的认识和研究,但关于SRB还原Cr(VI)的研究则相对较晚,主要始于20世纪末。研究至今,SRB在含铬(VI)废水处理中的应用价值已受到广泛认可。目前,鉴定出的对Cr(VI)具有还原作用的SRB大多为脱硫弧菌属(*Desulfovibrio* sp.)的菌株^[15-17]。SRB还原Cr(VI)的研究主要集中在3个方面:1)分离筛选出抗Cr(VI)的SRB,研究SRB混合菌群或单一的纯种SRB对Cr(VI)的还原性能及各种因素对还原效果的影响;2)研究SRB对Cr(VI)的还原机理,从SRB中分离纯化出蛋白酶,研究蛋白酶对Cr(VI)的还原活性;3)应用SRB处理工业含Cr(VI)废水,研究其处理工艺条件和工艺装置等。

2.1 硫酸盐还原菌还原Cr(VI)的影响因素

温度和pH是影响SRB还原Cr(VI)的两个重要因素。温度的高低,不仅影响到细菌的生长,也会对菌株酶活性产生影响。SRB一般在中性pH值、温度30℃~37℃时对Cr(VI)的还原效果最佳。汪频等^[15]从电镀废水的淤泥中分离出一株高效还原Cr(VI)的SRB,该菌在温度30℃、pH值7.0的条件下,耐受 10×10^{-3} mol/L的Cr(VI),对Cr(VI)去除率可达99.8%。Humphries等^[17]研究报道,*Desulfovibrio vulgaris*还原Cr(VI)的最适条件为pH 7.0、温度30℃~37℃。

电子供体对SRB还原解毒Cr(VI)也有重要影响。SRB还原Cr(VI)过程中,使用的电子供体不同,

Cr(VI)的还原率也会有所不同。研究表明,与柠檬酸盐、醋酸盐相比,甲酸盐更适于作为*Desulfovibrio vulgaris*还原Cr(VI)的电子供体,但研究也发现,甲酸盐和柠檬酸盐同时存在时,Cr(VI)还原效果又比甲酸盐单独存在时的效果好^[17]。

SRB还原Cr(VI)会受到共存阴离子和阳离子的影响。冯易君等^[18]研究了共存离子对SRB处理含Cr(VI)废水的影响,结果表明,共存阳离子 Sr^{2+} 、 Zn^{2+} 、 UO_2^{2+} 使铬的去除量略有增加, Ca^{2+} 、 Ag^+ 则使去除量减少,共存阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 的影响不大, SiF_6^{2-} 、EDTA及柠檬酸根使铬的去除量降低较多。

Cr(VI)初始浓度、菌废比等也是SRB还原Cr(VI)的影响因子。不同的菌株对Cr(VI)的耐受性不同,Cr(VI)浓度过高,会对SRB产生毒性影响,抑制菌株对Cr(VI)的还原。利用SRB菌液处理含Cr(VI)废水时,并非菌废比越高越好。菌废比达到某一比例时,相同时间内Cr(VI)的还原量反而随菌废比增高而降低^[19]。因此,利用SRB还原处理Cr(VI)时,需严格调控好这些因素,以获得理想的处理效果。

2.2 硫酸盐还原菌还原Cr(VI)的机理

SRB还原Cr(VI)主要通过两种作用机理:间接作用和直接作用。间接作用机理认为Cr(VI)的还原主要是由于SRB的代谢产物或还原 SO_4^{2-} 生成的 H_2S 与Cr(VI)反应所致;直接作用机理则认为Cr(VI)的还原是菌体内的一些还原酶作用的结果。

瞿建国等^[16]从土壤中分离得到一株能有效去除Cr(VI)的脱硫弧菌,发现该菌本身不存在还原Cr(VI)的能力,它不是靠自身还原酶的作用直接将Cr(VI)还原,而是通过代谢活动产生的还原性物质(如 S^{2-} 等)与Cr(VI)发生反应来去除Cr(VI)的。Fude等^[20]研究SRB混合菌群对Cr(VI)的还原时也发现Cr(VI)的还原是通过SRB还原 SO_4^{2-} 生成的 H_2S 与Cr(VI)反应完成的。

另一些研究认为SRB还原Cr(VI)主要是菌体中的某些酶起作用。Smith等^[21]采用从底泥中富集培养的SRB混合菌群还原铬酸盐,发现实验过程中并未有 H_2S 产生,且不存在其他的化学还原现象,认为Cr(VI)的还原可能是细菌本身的还原酶起作用。

相关的学者还从SRB中分离纯化出Cr(VI)还原酶,对其还原活性进行研究。目前,从SRB菌体中分离出的具有Cr(VI)还原能力的酶蛋白主要有两类:

细胞色素c和氢化酶。这些还原酶在Cr()还原中主要起电子传递作用,即有机物在SRB的作用下被降解并释放出电子,酶蛋白再将电子传递给Cr(),使Cr()还原为Cr()。1994 年, Lovely等^[22]从*Desulfovibrio vulgaris*中分离出细胞色素_c₃,首次报道了其对于铬酸盐的还原作用。2001 年, Michel等^[23]从几株不同的SRB中分离出几种具有Cr()还原能力的细胞色素c和氢化酶。其中,从*Desulfomicrobium norvegicum*中分离的细胞色素_c₃和从*Desulfovibrio vulgaris*中分离的[Fe]氢化酶表现出相对较高的还原

速率,而从*Desulfovibrio vulgaris*中分离的c₅₅₃对Cr()无还原作用(表 1),作者指出这可能与c₅₅₃的氧化还原电位相对较高(为+50mV),而其他还原酶的氧化还原电位都较低(为负值)有关。2003 年, Chardin 等^[24]从*Desulfovibrio vulgaris* Hildenborough、*Desulfomicrobium norvegicum*、*Desulfovibrio fructosovorans*中分离纯化出 3 种氢化酶: [Fe]氢化酶、[NiFeSe]氢化酶、[NiFe]氢化酶,发现[Fe]氢化酶的还原速率最高,同时指出完整菌体还原Cr()是菌体内多种还原酶参与的结果。

表 1 硫酸盐还原菌中的 Cr(VI)还原酶
Table 1 Cr() reductase purified from sulfate-reducing bacteria

硫酸盐还原菌 Sulfate-reducing bacteria	酶蛋白 Enzymes	Cr()还原率 Rate of Cr() reduction [Cr()]/(min·mg)]	参考文献 References
<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	细胞色素 _c ₃	391±18	[23]
<i>Desulfomicrobium norvegicum</i>	细胞色素 _c ₃	739±56	
<i>Desulfuromonas acetoxidans</i>	细胞色素 _c ₇	557±25	
<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	细胞色素 _c ₅₅₃	无	
<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	[Fe]氢化酶	7679±4	
<i>Desulfomicrobium norvegicum</i>	[Ni-Fe-Se]氢化酶	161±3	

2.3 硫酸盐还原菌处理含 Cr(VI)废水的研究

国内外对SRB处理含Cr()废水的工艺条件、反应装置等进行了研究报道,为SRB在含Cr()废水处理中的应用奠定了基础。张介弛等^[25]研究了SRB在还原剂的参与下于废水净化池中净化含铬电镀废水中试试的工艺条件,结果表明,在净化工艺中,向净化池中加入 0.015%还原剂、0.1%菌液量,Cr()和总铬的去除率均接近 100%,且形成了胶体Cr(OH)₃,净化工艺具有良好的稳定性。Çetin等^[26]用SRB混合菌群处理含Cr()和染料的纺织工业废水,当Cr()初始浓度为 22.7 mg/L~74.9 mg/L时,仅处理 2 d~6 d,就有 99% Cr()被还原。

SRB处理含Cr()废水,可采用包埋剂对SRB进行包埋固定,以固定化的SRB处理含Cr()废水。柴立元等^[27]以海藻酸钠、聚乙烯醇为包埋剂,包埋固定经驯化后的SRB占优的活性污泥,采用包埋小球对含铬废水进行连续化处理,发现Cr()的去除率达到 99.68%,出水总Cr浓度为 0.45 mg/L,且铬以氢氧化铬沉淀的形式与颗粒球分离,有利于铬的回收,与游离活性污泥相比,固定化小球抗毒性能好,

更加稳定高效。

一些学者还研究报道了SRB在不同的生物反应器中处理含Cr()废水的效果。Battaglia-Brunet等^[28]用装有不同填料的固定化膜生物反应器接种*Desulfomicrobium norvegicum*处理含Cr()废水,发现其还原速率与填料的表面积有关,用填充有火山灰的固化床进行实验时,发现进水中Cr()的浓度影响其还原速率。Chang等^[29]采用两段式填充床反应器对含Cr()和SO₄²⁻的电镀废水进行生物处理,Cr()和SO₄²⁻均被有效去除,同时发现Cr()和SO₄²⁻的去除率与废水中有机物(电子供体)的消耗率有密切关系,而Cr()的还原与SRB还原SO₄²⁻产生的硫化物有关。

3 结论与展望

与传统的物理和化学方法相比,微生物治理铬污染具有费用低,能耗省和不易产生二次污染的优点。作为自然界中一类广泛存在的细菌,SRB 不仅可以吸附铬离子,还可以将高毒的 Cr()还原为低毒的 Cr(),其在 Cr()污染治理中具有广阔的应用前景。

但是,关于SRB还原Cr(Ⅵ)的研究还有待进一步的深入,主要可从以下几方面开展:1)目前,应用SRB中单一的菌种还原Cr(Ⅵ)的仅限于*Desulfovibrio vulgaris*、*Desulfomicrobium norvegicum*等几种常见SRB,有必要对其他SRB还原Cr(Ⅵ)进行研究,这有助于更深入、全面的了解SRB还原Cr(Ⅵ)的机理和特性。2)SRB可以许多有机物作为自身代谢所需的碳源或能源,因此在研究SRB还原Cr(Ⅵ)时可以有有机污染物作为碳源,研究其同步去除Cr(Ⅵ)和有机污染物的效果。3)目前,关于SRB还原Cr(Ⅵ)的反应动力学的研究报道甚少,建立描述SRB还原Cr(Ⅵ)的数学模型,分析其动力学过程,亦是研究SRB对Cr(Ⅵ)还原特性的一项重要内容。4)在实际的Cr(Ⅵ)污染治理中,处理效果会受到多种因素的影响,深入研究SRB处理含Cr(Ⅵ)废水工艺,如工艺参数的优化、反应装置的改进等将对提高SRB处理实际含Cr(Ⅵ)废水的效果起到指导作用。

参 考 文 献

- [1] 李亚新,苏冰琴.硫酸盐还原菌和酸性矿山废水的生物处理.环境污染治理技术与设备,2000,1(5):1-11.
- [2] 易正戟,谭凯旋,澹爱丽,等.硫酸盐还原菌及其在工业和矿山废水治理中的应用.云南师范大学学报,2006,26(3):39-45.
- [3] 赵宇华,叶央芳,刘学东.硫酸盐还原菌及其影响因子.环境污染与防治,1997,19(5):41-43.
- [4] Cabrera G, Pérez R, Gómez JM, et al. Toxic effects of dissolved heavy metals on *Desulfovibrio vulgaris* and *Desulfovibrio* sp. strains. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **A135**: 40-46.
- [5] 苏冰琴,李亚新.EGSB反应器中硫酸盐还原与重金属去除.中国矿业大学学报,2008,37(2):246-249.
- [6] Jong T, Parry DL. Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs. *Water Research*, 2003, **14**(37): 3379-3389.
- [7] 潘响亮,王建龙,张道勇.硫酸盐还原菌混合菌群胞外聚合物对Cu²⁺的吸附和机理.水处理技术,2005,31(9):25-28.
- [8] Pruden A, Messner N, Pereyra L, et al. The effect of inoculum on the performance of sulfate-reducing columns treating heavy metal contaminated water. *Water Research*, 2007, **41**: 904-914.
- [9] Neculita CM, Zagury GJ, Bussière B. Effectiveness of sulfate-reducing passive bioreactors for treating highly contaminated acid mine drainage: II. Metal removal mechanisms and potential mobility. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**: 3545-3560.
- [10] Wei L, Ma F, Wang Q, et al. Investigation of the reduction performance of sulfate-reducing bacteria enhanced by nano-meter/submicron tourmaline. *Journal of Biotechnology*, 2008, **136S**: S142.
- [11] Kosińska K, Miśkiewicz T. Performance of an anaerobic bioreactor with biomass recycling, continuously removing COD and sulphate from industrial wastes. *Bioresource Technology*, 2009, **100**: 86-90.
- [12] Chockalingam E, Subramanian S. Utility of *Eucalyptus tereticornis* (Smith) bark and *Desulfotomaculum nigrificans* for the remediation of acid mine drainage. *Bioresource Technology*, 2009, **100**: 615-621.
- [13] 李亚新,苏冰琴.利用硫酸盐还原菌处理酸性矿山废水研究.中国给水排水,2000,16(2):13-17.
- [14] Lee KH, Sublette KL. Simultaneous combined microbial removal of sulfur dioxide and nitric oxide from a gas stream. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1991, **28/29**: 623.
- [15] 汪频,李福德,刘大江.硫酸盐还原菌还原铬(Ⅵ)的研究.环境科学,1994,14(6):1-4.
- [16] 瞿建国,申如香,徐伯兴,等.硫酸盐还原菌还原Cr(Ⅵ)的初步研究.华东师范大学学报(自然科学版),2005,3(1):105-110.
- [17] Humphries AC, Macaskie LE. Reduction of Cr(Ⅵ) by *Desulfovibrio vulgaris* and *Microbacterium* sp.. *Biotechnology Letters*, 2002, **24**: 1261-1267.
- [18] 瞿建国,申如香,徐伯兴,等.微生物法处理含铬(Ⅵ)废水的研究.化工环保,2005,25(1):1-4.
- [19] 冯易君,谢家理,向芹,等.共存离子对硫酸盐还原菌(SRB)处理含铬废水的影响研究.环境污染与防治,1995,17(4):15-17.
- [20] Fude L, Harris B, Urrutia MM, et al. Reduction of Cr(Ⅵ) by a consortium of sulfate-reducing bacteria (SRBIII). *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, **60**(5): 1525-1531.
- [21] Smith WL, Gadd GM. Reduction and precipitation of chromate by mixed culture sulphate-reducing bacterial biofilms. *Journal of Applied Microbiology*, 2000, **88**: 983-991.
- [22] Lovley DR, Phillips EJP. Reduction of chromate by *Desulfovibrio vulgaris* and its c₃ cytochrome. *Appl Environ Microbiol*, 1994, **60**: 726-728.
- [23] Michel C, Brugna M, Aubert C, et al. Enzymatic reduction of chromate: comparative studies using sulfate-reducing bacteria. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2001, **55**: 95-100.
- [24] Chardin B, Giudici-Orticoni MT, Luca GD, et al. Hydrogenases in sulfate-reducing bacteria function as chromium

- reductase. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2003, **63**: 315–321.
- [25] 张介弛, 田小光, 于德水, 等. 硫酸盐还原菌净化含铬电镀废水的中试研究. *生物技术*, 1997, **7**(1): 32–34.
- [26] Çetin D, Dönmez S, Dönmez G. The treatment of textile wastewater including chromium() and reactive dye by sulfate-reducing bacterial enrichment. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**: 76–82.
- [27] 柴立元, 唐宁, 闵小波, 等. 硫酸盐还原菌包埋固定化技术处理含铬废水. *中南大学学报(自然科学版)*, 2005, **36**(6): 965–970.
- [28] Battaglia-Brunet F, Foucher S, Morin D, *et al.* Chromate(CrO_4^{2-}) reduction in groundwaters by using reductive bacteria in fixed-bed bioreactors. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 2004, **4**: 127–135.
- [29] Chang IS, Kim BH. Effect of sulfate reduction activity on biological treatment of hexavalent chromium [Cr()] contaminated electroplating wastewater under sulfate-rich condition. *Chemosphere*, 2007, **68**: 218–226.

~~~~~  
(上接 p.1030)

## 征 稿 简 则

### 3.4 摘要写作注意事项

#### 3.4.1 英文摘要:

1) 建议使用第一人称, 以此可区分研究结果是引用文献还是作者得出的; 2) 建议用主动语态, 被动语态表达拖沓模糊, 尽量不用, 这样可以避免好多长句, 以求简单清晰; 3) 建议使用过去时态, 要求语法正确, 句子通顺; 4) 英文摘要的内容应与中文摘要一致, 但可比中文摘要更详尽, 写完后务必请英文较好且专业知识强的专家审阅定稿后再返回编辑部。5) 摘要中不要使用缩写语, 除非是人人皆知的, 如: DNA, ATP 等; 6) 在英文摘要中, 不要使用中文字体标点符号。

3.4.2 关键词: 应明确、具体, 一些模糊、笼统的词语最好不用, 如基因、表达……

## 4 特别说明

### 4.1 关于测序类论文

凡涉及测定 DNA、RNA 或蛋白质序列的论文, 请先通过国际基因库 EMBL (欧洲) 或 GenBank (美国) 或 DDBJ (日本), 申请得到国际基因库登录号 (Accession No.) 后再投来。

### 4.2 关于版权

4.2.1 本刊只接受未公开发表的文章, 请勿一稿两投。

4.2.2 凡在本刊通过审稿、同意刊出的文章, 所有形式的 (即各种文字、各种介质的) 版权均属本刊编辑部所有。作者如有异议, 敬请事先声明。

4.2.3 对录用的稿件编辑部有权进行文字加工, 但如涉及内容的大量改动, 将请作者过目同意。

4.2.4 文责自负。作者必须保证论文的真实性, 因抄袭剽窃、弄虚作假等行为引发的一切后果, 由作者自负。

### 4.3 审稿程序及提前发表

4.3.1 来稿刊登与否由编委会最后审定。凡被录用的稿件将及时发出录用通知, 对不录用的稿件, 一般在收稿 1 个月之内通过 E-mail 说明原因, 打印稿不退。稿件经过初审、终审通过后, 作者根据编辑部返回的退修意见进行修改补充, 然后以投稿时的用户名和密码登陆我刊网上传电子版修改稿, 待编辑部复审后将给作者发送稿件录用通知单, 请作者将修改稿纸稿和签字盖章后的承诺书一并寄回编辑部, 按照稿号顺序进入排队发表阶段。

4.3.2 对投稿的个人和单位一视同仁。坚持文稿质量为唯一标准, 对稿件采取择优先登的原则。如作者要求提前发表, 请在投稿的同时提出书面报告, 说明该研究成果的重要性、创新性、竞争性和提前发表的必要性, 经过我刊的严格审查并通过后, 可予提前刊出。

## 5 发表费及稿费

论文一经录用, 将在发表前根据版面收取一定的发表费并酌付稿酬、赠送样刊及单行本。

## 6 联系我们

地址: 北京市朝阳区北辰西路 1 号院 3 号中国科学院微生物研究所《微生物学通报》编辑部 (100101)

Tel: 010-64807511

E-mail: tongbao@im.ac.cn

网址: <http://journals.im.ac.cn/wwxtbcn>