

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)

CoCuMnO₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的优势藻种筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选

李鑫¹, 胡洪营², 余骏一³, 赵文玉³

(1. 火箭军工程设计研究院, 北京 100011; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004)

摘要: 随着核工业的发展, 含铀放射性废水的产生量越来越大, 必须进行妥善处理与处置. 微藻吸附技术是近年来放射性废水处理领域的研究热点, 而获得吸附铀的优势藻种则是该技术得以研究和应用的基础. 从工程应用的角度出发确定了筛选原则, 并针对 11 株备选藻种进行了优势藻种筛选工作. 栅藻 LX1 对铀的吸附容量最大, 为 $40.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 在 mBG11 培养基(模拟城镇污水处理厂污染物排放一级 A 标准的氮磷浓度限值)中的生物质产量较高, 为 $0.32 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 生长进入稳定期后的沉降性能较好, 沉降率为 45.3%. 综上, 在本研究范围内, 栅藻 LX1 为放射性废水处理中吸附铀的优势藻种.

关键词: 放射性废水; 铀; 生物吸附; 微藻; 藻种筛选

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1858-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.05.033

Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment

LI Xin¹, HU Hong-ying², YU Jun-yi³, ZHAO Wen-yu³

(1. Engineering Design and Research Institute of Rocket Force, Beijing 100011, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The amount of radioactive wastewater discharge was increasing year by year, with the quick development of nuclear industry. Therefore, the proper treatment and disposal of radioactive wastewater are essentially important for environmental safety and human health. Microalgal biosorption of nuclide has drawn much attention in the area of radioactive wastewater treatment recently, and the selection of a proper microalgal species for uranium biosorption is the basis for the research and application of this technology. The selection principle was set up from the view of practical application, and 11 species of microalgae were prepared for the selection work. *Scenedesmus* sp. LX1 has the highest biosorption capacity of $40.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ for uranium; and its biomass production in mBG11 medium (simulating the nitrogen and phosphorus limits in the first-class A discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant) was $0.32 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, which was relatively high among the 11 microalgal species; when grown into stable phase it also showed a good precipitation capability with the precipitation ratio of 45.3%. Above all, in our selection range of the 11 microalgal species, *Scenedesmus* sp. LX1 could be considered as the suitable species for uranium biosorption in radioactive wastewater treatment.

Key words: radioactive wastewater; uranium; biosorption; microalgae; selection of microalgal species

铀是一种具有放射性和高毒性的重金属元素, 对生态环境和人体健康存在极大威胁. 在核工业生产(如核电站)的各个环节及核事故中, 均会产生一定量的含铀放射性废水^[1]. 因此, 需要对含铀放射性废水进行妥善处理与处置.

传统的放射性废水处理技术大多采用物理法或物理化学法. 用于处理低、中放射性废水的技术主要包括化学沉淀、蒸发、离子交换和膜分离(低放废水)等^[2]. 虽然传统的放射性废水处理技术在大部分情况下对放射性核素的去除效率较高, 并且技术发展较为成熟, 但仍存在处理低浓度废水时效率较低^[3]、药剂消耗大(化学沉淀)、能耗高(蒸发)、易腐蚀与结垢(蒸发)、易产生二次污染^[4]等局限性.

除上述传统技术外, 吸附技术因操作简单和处理效率高等优点, 在放射性废水处理领域研究较多^[5], 尤其生物吸附技术更是引起了广泛关注^[6-8]. 许多微生物如细菌、放线菌、真菌和微藻等, 均可作为生物吸附剂^[9-14]. 其中, 利用微藻作为吸附剂具有独特的技术优势: 易于培养, 可利用太阳光将 CO_2 直接转化为生物质, 甚至可以在经过预处理的生活污水中生长^[15,16]; 藻细胞易于分离收获; 能耗低; 无二次污染, 环境生态友好; 有可能对有价值的重金属进行回收^[6,17-20]. 因此, 利用微藻作为生物吸附剂处理含铀放射性废水, 已成为近年来放射性废水处理领域的研究热点.

收稿日期: 2015-10-22; 修订日期: 2015-12-17

作者简介: 李鑫(1983~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境工程, E-mail: l-x02@mails.tsinghua.edu.cn

获得吸附铀的优势藻种是研究和应用微藻生物吸附技术的前提和基础. 从实际工程应用的角度出发, 优势藻种的筛选原则应综合考虑多种因素.

(1) 吸附容量大 单位藻细胞生物质对铀元素的吸附量尽可能大, 从而减少微藻吸附剂的投加量, 同时提高含铀放射性废水的处理效率.

(2) 培养成本低 微藻培养的成本较高, 限制了其在污水处理和生物能源生产等领域的工程化应用. 微藻生长对水和氮磷无机盐的大量消耗是造成其高培养成本的首要因素^[21]. 若藻种能在生活污水一级、二级处理出水中生长, 则可充分利用其中的水和氮磷资源, 从而降低培养成本.

(3) 生物质产量高 藻种可在生活污水二级处理出水等低氮磷水体中生长, 且生物质产量高.

(4) 沉降性能好 藻种在培养进入稳定期后, 藻细胞沉降速率快, 以利于分离收获.

本研究以上述筛选原则为基础, 选择了 11 株备选藻种进行吸附铀的优势藻种筛选工作, 以期为后续研究提供材料基础.

1 材料与方 法

1.1 材料

1.1.1 藻种

备选藻种共计 11 株, 包括 8 株实验室分离藻种和 3 株购买藻种.

在 8 株实验室分离藻种中, 栅藻 LX1 (*Scenedesmus* sp. LX1) 由长期储存的自来水中分离获得; 小球藻 ZTY1 (*Chlorella* sp. ZTY1)、小球藻

ZTY2 (*Chlorella* sp. ZTY2)、斜生栅藻 ZTY (*Scenedesmus obliquus* ZTY) 和椭圆栅藻 ZTY (*Scenedesmus ovalternus* ZTY) 由城镇生活污水一级出水中分离获得; 栅藻 ZSF1 (*Scenedesmus* sp. ZSF1)、栅藻 ZSF2 (*Scenedesmus* sp. ZSF2) 和羊角月牙藻 ZSF (*Selenastrum* sp. ZSF) 由以再生水为补充水源的景观水体 (北京高碑店湖) 中分离获得. 由上述 8 株藻种的分离环境可以看出, 本研究旨在获得 1 株既对铀有良好的吸附性能、又可在低氮磷水体 (以城镇生活污水一级出水为代表) 中生长的优势藻种, 以降低工程化应用时的藻细胞培养成本.

其余 3 株藻种均购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库.

11 株备选藻种的具体情况如表 1 所示.

1.1.2 藻细胞培养基

采用低氮磷水平的 mBG11 培养基, 模拟城镇污水处理厂污染物排放一级 A 标准的氮磷浓度限值 (TN 为 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 成分组成为: NaNO_3 $91.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其余组分同稀释 50% 的 BG11 培养基, 包括 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $37.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、柠檬酸 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、柠檬酸亚铁铵 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、EDTA (乙二胺四乙酸) $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Na_2CO_3 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{A}_5 + \text{Co}$ 溶液 $1.0 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$. $\text{A}_5 + \text{Co}$ 溶液的组成为: H_3BO_3 $2.86 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $1.81 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $222 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $390 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 11 株备选藻种

Table 1 The 11 microalgal species for selection

藻种	拉丁名	来源	培养基
小球藻 ZTY1	<i>Chlorella</i> sp. ZTY1	一级出水	mBG11
小球藻 ZTY2	<i>Chlorella</i> sp. ZTY2	一级出水	mBG11
斜生栅藻 ZTY	<i>Scenedesmus obliquus</i> ZTY	一级出水	mBG11
椭圆栅藻 ZTY	<i>Scenedesmus ovalternus</i> ZTY	一级出水	mBG11
栅藻 ZSF1	<i>Scenedesmus</i> sp. ZSF1	高碑店湖	mBG11
栅藻 ZSF2	<i>Scenedesmus</i> sp. ZSF2	高碑店湖	mBG11
羊角月牙藻 ZSF	<i>Selenastrum</i> sp. ZSF	高碑店湖	mBG11
栅藻 LX1	<i>Scenedesmus</i> sp. LX1	自来水	mBG11
普通小球藻	<i>Chlorella vulgaris</i>	淡水藻种库	mBG11
羊角月牙藻	<i>Selenastrum</i> sp.	淡水藻种库	mBG11
雨生红球藻	<i>Haematococcus pluvialis</i>	淡水藻种库	mBG11

1.1.3 主要仪器设备

人工光照培养箱 (HPG-280H)、高温灭菌锅 (SANYO MLS-3750)、离心机 (HITACHI CF 16RX

II)、超净工作台 (AIRTECH VS-1300L-U)、恒温水浴锅 (ANPEL DC-12H)、精密电子分析天平 (岛津 AUY220)、冷冻干燥机 (FDU-1100)、pH 计

(Sartorius PB-10)、双功能水浴恒温振荡器(SHA-B)、紫外可见分光光度计(UV-2401PC)。

1.2 方法

1.2.1 藻细胞培养

向 500 mL 锥形瓶中加入 200 mL mBG11 培养基,高温高压灭菌(121℃,30 min,除特别指出,所有水样在微藻培养前均经过高温高压灭菌处理),取 5 mL 藻种液接种至上述培养基中,放入光照培养箱中培养。

培养条件:光照强度 $56 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,光暗比 14 h:10 h,温度 25℃。

1.2.2 藻种分离

藻种分离的方法为平板划线法。

向 50 mL mBG11 液体培养基中接种藻种,培养 3~4 d 后,将藻种液分别稀释 1、2、5、10 和 20 倍,然后划线涂在 mBG11 固体培养基(琼脂含量 2.5%)平板上,再置于光照培养箱中培养,培养条件同 1.2.1 节。

待固体平板上长出单个藻落后,挑取单个藻落再次进行划线分离和培养。反复 3 次后得到纯藻种。

1.2.3 藻细胞干重测定

将孔径为 0.45 μm 的滤膜浸泡在高纯水中并煮沸,重复 3 次以除去滤膜中的杂质。将煮后的滤膜在 105℃ 烘箱中烘干 24 h,在干燥器中晾至室温后用千分之一天平称取其重量。取适量藻液用上述滤膜过滤,将截留藻细胞的滤膜在 105℃ 烘箱中烘干 24 h,在干燥器中晾至室温后用千分之一天平称取其重量。前后两次测得的滤膜质量差即为藻细胞干重。

1.2.4 藻细胞沉降性测定

待藻细胞生长进入稳定期后,测量藻细胞干重。在室温下取 200 mL 摇匀藻液,置于 Imhoff 沉降管中静置沉降 60 min,将上清液(180 mL)倒出,利用滤膜法测量底部 20 mL 浓藻液的藻细胞干重,再根据式(1)计算沉降率 S 。

$$S = \frac{0.1m}{X_m} \times 100\% \quad (1)$$

式中, S :表征藻液中可沉降部分占总生物质的比例,%; X_m :原藻液的藻干重, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; m :Imhoff 沉降管底部 20 mL 浓缩藻液的藻干重, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

沉降率 S 的值越大,表明藻细胞的沉降性越好。

1.2.5 溶液中 U(VI) 含量的测定

溶液中 U(VI) 含量的测定采用 5-Br-PADAP 分

光光度法,具体测定步骤如下。

(1) 配制试剂

① 混合掩蔽剂溶液:称取 12 g 环己二胺四乙酸(CyDTA),溶于 $150 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠溶液,加入 3 g 氟化钠、32 g 磺基水杨酸和 400 mL 水。待全部溶解后,调节溶液 pH 至 8,然后加水稀释至 500 mL。

② 酚酞指示剂: $0.1 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙醇溶液。③ 三乙醇胺缓冲溶液:取 100 mL 三乙醇胺溶于 300 mL 水中,调节溶液 pH 至 8,再加水稀释至 500 mL,混匀。④ 丙酮:纯丙酮试剂。⑤ 显色剂 Br-PADAP 乙醇溶液:称取 0.25 g Br-PADAP 溶于 500 mL 无水乙醇溶液。

(2) 绘制标准曲线

取 6 个 50 mL 容量瓶,分别加入含有 0、10、20、30、40、50 μg 铀的标准溶液[硝酸双氧铀, $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$];加入 5 mL 混合掩蔽剂溶液和 1 滴酚酞指示剂;先用 $400 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠溶液调至粉红色,再用 $1 \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸调至无色;加入 3 mL 三乙醇胺缓冲溶液、10 mL 丙酮和 3 mL 显色剂 Br-PADAP 乙醇溶液;用水稀释至刻度,摇匀。放置 30~60 min 后,以空白溶液为参比,测定铀标准溶液在 580 nm 下的吸光度值 D_{580} ,并建立 D_{580} 与铀质量(μg)关系的标准曲线,如图 1 所示。

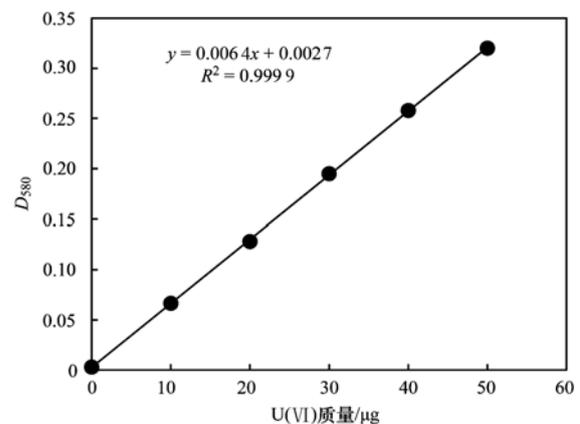


图 1 铀标准溶液在 580 nm 下的吸光度 D_{580} 和 U(VI) 质量的关系曲线

Fig. 1 Relationship between D_{580} of uranium standard solution at 580 nm and U(VI) content

1.2.6 藻细胞对铀的吸附容量测定^[22]

待藻细胞在 mBG11 培养基中生长进入稳定期后,对藻细胞进行离心收获、冷冻干燥、研磨,制成藻干粉。

用移液管量取 50 mL 已知质量浓度的铀溶液至 100 mL 带塞锥形瓶中,用 $0.1 \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸和 NaOH 溶液调节 pH 值至 4,加入一定量的藻粉,置

于 30℃ 水浴恒温振荡器中振荡 60 min. 吸附过程结束后,取一定量混合液离心(10 000 r·min⁻¹, 10 min, 4℃),取上清液用 5-Br-PADAP 分光光度法测定其吸光度 D_{580} ,并根据吸光度 D_{580} 和 U(VI) 质量的关系曲线计算上清液中的铀离子含量. 藻细胞对铀离子的吸附容量 q_t (mg·g⁻¹) 可通过式(2)计算:

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t)V}{m} \quad (2)$$

式中, q_t : 藻细胞对铀离子的吸附容量, mg·g⁻¹; c_0 : 铀溶液的初始浓度, mg·L⁻¹; c_t : 上清液中的铀浓度, mg·L⁻¹; V : 铀溶液的体积, L; m : 加入藻粉的质量, g.

1.2.7 试验数据处理

每组试验均做 3 个平行样,并对试验数据进行误差分析.

2 结果与分析

2.1 不同藻种对铀的吸附容量比较

藻细胞对铀的吸附容量是筛选优势藻种需要考虑的首要因素. 分别取 11 株备选藻种的 25 mg 藻干粉加入 50 mL 初始铀浓度为 50 mg·L⁻¹ 的铀溶液中,在 30℃ 水浴恒温下振荡 60 min 后,不同藻种对铀的吸附容量对比如图 2 所示. 从中可见,在 11 株备选藻种中,栅藻 LX1 对铀的吸附容量最大,为 40.7 mg·g⁻¹,其次是普通小球藻.

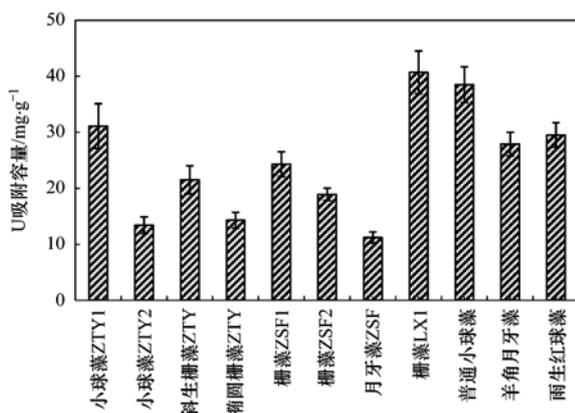


图2 不同藻种对铀的吸附容量对比

Fig. 2 Comparison of U-biosorption capability of different microalgal species

2.2 不同藻种在 mBG11 培养基中的最大生物量比较

11 株备选藻种在 mBG11 培养基中生长 16 d、进入稳定期后的最大生物量对比如图 3 所示,可代表藻种在城镇生活污水二级处理出水中的最大生长潜力. 除月牙藻 ZSF 的最大生物量较低(仅 0.16 g·L⁻¹)外,其余所有藻种的最大生物量均在 0.27

g·L⁻¹ 以上,尤其是栅藻 ZSF1、小球藻 ZTY2、栅藻 LX1 等 8 株藻种的最大生物量达到了 0.30 ~ 0.40 g·L⁻¹ 之间.

在一般的微藻培养体系中,典型的藻细胞生物量水平^[23] 为 0.30 ~ 0.40 g·L⁻¹. 可见,除月牙藻 ZSF 外,绝大部分藻种均在城镇生活污水二级处理出水中较大的生长潜力. 其原因为,从污水处理厂或实际水体中分离得到的藻种,往往能够更好地适应实际水体环境,生长状况更好^[24].

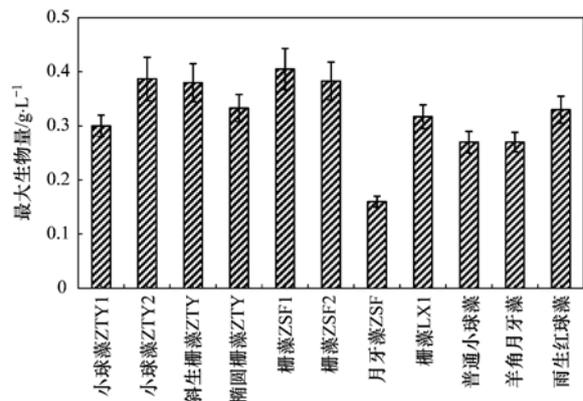


图3 不同藻种在 mBG11 培养基中生长 16 d 后的最大生物量对比

Fig. 3 Comparison of the highest biomass production of different microalgal species cultivated in mBG11 medium for 16 days

2.3 不同藻种的沉降性能比较

沉降率 S 表征了藻液静置 60 min 后,易于自然沉降的藻细胞物质占总生物物质的比例. 重力沉降是最简单、最常用的藻细胞收获方式之一,沉降率 S 越高,表明藻细胞越易于通过重力沉降收获. 11 株备选藻种生长进入稳定期后的沉降率对比如图 4 所示.

可见,雨生红球藻和所有栅藻的沉降率普遍较高,均在 40.0% 以上;其中,栅藻 ZSF1、雨生红球藻和栅藻 LX1 的沉降率较高,分别为 48.7%、47.9% 和 45.3%. 小球藻的沉降率相对较低,均在 30.0% 左右. 羊角月牙藻的沉降率最低,仅为 24.6%.

3 讨论

3.1 藻细胞对铀的吸附容量

Kalin 等^[25] 总结了不同藻种对 U(VI) 的吸附能力,如表 2 所示. 其中, *Pseudomonas* 对铀的吸附容量最大,为 96 000 mg·g⁻¹; 吸附容量在 100 ~ 600 mg·g⁻¹ 之间的藻种有 13 株,占总数的 56.5%; 吸附容量在 100 mg·g⁻¹ 以下的藻种有 9 株,占总数的 39.1%. 栅藻 LX1 对铀的吸附容量在表 2 中属于后

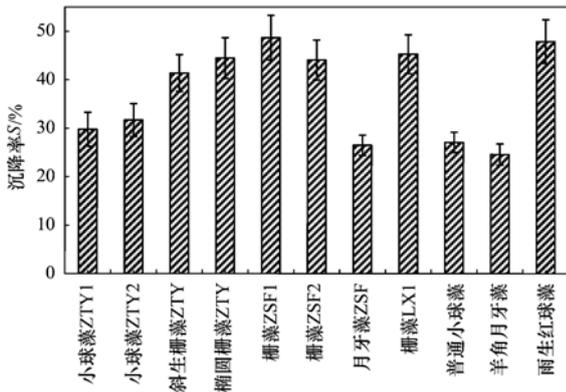


图 4 不同藻种生长进入稳定期后的沉降率对比

Fig. 4 Comparison of the precipitation ratio of different microalgal species grown into stable phase

表 2 藻种对U(VI)的吸附容量对比^[25]

Table 2 Comparison of U(VI)-biosorption capability of reported microalgal species

编号	藻种	吸附容量 /mg·g ⁻¹	吸附过程 pH
1	<i>Pseudomonas</i>	96 000	
2	<i>Saccharomyces</i>	571	
3	<i>Sargassum</i>	560	4
4	<i>Pseudomonas</i>	541	冻干
5	<i>Sargassum</i>	524	
6	<i>Aspergillus</i>	423	
7	<i>Pseudomonas</i>	410	5
8	<i>Saccharomyces</i>	360	
9	<i>Sargassum</i>	330	3.2
10	<i>Talaromyces</i>	323	5
11	<i>Rhizopus</i>	>180	4
12	<i>Kluyveromyces</i>	180	
13	<i>Sargassum</i>	150	2.6
14	<i>Saccharomyces</i>	138	
15	<i>Scenedesmus</i>	75	
16	<i>Rhizopus arrhizus</i>	42.3	3.5
17	<i>Peltigera</i>	42	4.0~5.0
18	<i>Aspergillus</i>	40	4.0~5.0
19	<i>Cladonia</i>	29	
20	<i>Chlorella</i>	28.5	3.5
21	<i>Penicillium</i> spp.	20.3	3.5
22	<i>Chlorella</i>	15.6	
23	<i>Umbilicaria</i>	10	

40% ,与表中栅藻的吸附容量(75 mg·g⁻¹)同属一个数量级.

虽然栅藻 LX1 对铀的吸附容量与已有报道的藻种相比并不具有优势,但如前文的筛选原则所述,面向实际应用,不能仅关注吸附容量,还应综合考虑藻细胞培养成本、藻细胞易培养性、藻细胞沉降性能等多种因素.

3.2 吸附铀的优势藻种确定

藻种对铀的吸附容量及其在低氮磷水体(城镇生活污水处理厂二级处理出水)中的生长潜力,是藻种筛选的两项主要指标. 以不同藻种在 mBG11 培养基中的最大生物量为横坐标、对铀的吸附容量为纵坐标,绘制优势藻种筛选图,如图 5 所示.

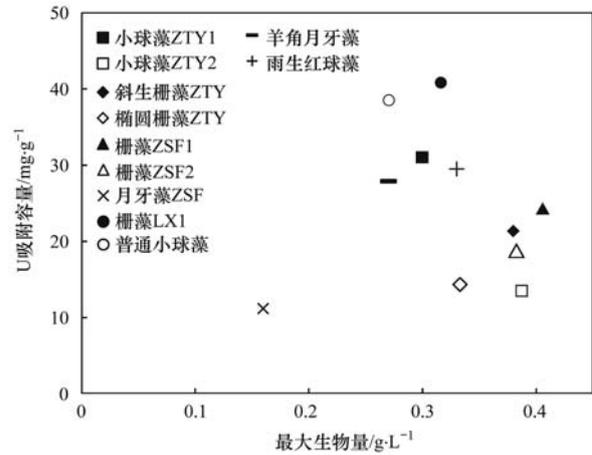


图 5 吸附铀的优势藻种筛选对比

Fig. 5 Selection of the suitable microalgal species for uranium biosorption

越靠近上方的点,表明藻种对铀的吸附容量越高;越靠近右方的点,表明藻种在低氮磷水体中的生长潜力越大. 根据筛选原则,应选择右上方的点作为优势藻种.

通过图 5 可以看出,栅藻 LX1 处于图中的右上方位置:其对铀的吸附容量最高,并且在低氮磷水体中的生长潜力也较大. 同时,栅藻 LX1 在生长进入稳定期后的沉降性能也较好. 因此,在本研究范围内,可确定栅藻 LX1 为放射性废水处理中吸附铀的优势藻种.

4 结论

(1) 优势藻种应具备对铀的吸附容量大、培养成本低(可在生活污水二级处理出水中生长)、在低氮磷水体中的生物质产量高、沉降性能好等特点.

(2) 栅藻 LX1 对铀的吸附容量最大,为 40.7 mg·g⁻¹.

(3) 栅藻 LX1 在 mBG11 培养基(模拟城镇污水处理厂污染物排放一级 A 标准的氮磷浓度限值:TN 15 mg·L⁻¹,TP 1.5 mg·L⁻¹)中的生物质产量较高,为 0.32 g·L⁻¹.

(4) 栅藻 LX1 在生长进入稳定期后的沉降性能较好,沉降率为 45.3%.

(5)综合考虑各项筛选原则,在本研究范围内,栅藻 LX1 为放射性废水处理中吸附铀的优势藻种.

参考文献:

- [1] Vogel M, Günther A, Rossberg A, *et al.* Biosorption of U(VI) by the green algae *Chlorella vulgaris* in dependence of pH value and cell activity[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **409**(2): 384-395.
- [2] 顾忠茂. 核废物处理技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2009. 80-231.
- [3] Bhat S V, Melo J S, Chaugule B B, *et al.* Biosorption characteristics of uranium (VI) from aqueous medium onto *Catenella repens*, a red alga[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **158**(2-3): 628-635.
- [4] 胡月薇, 邱承光, 曲春波, 等. 小球藻处理废水研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2003, **26**(4): 48-49, 64.
- [5] Febrianto J, Kosasih A N, Sunarso J, *et al.* Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: a summary of recent studies[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162**(2-3): 616-645.
- [6] Das N. Remediation of radionuclide pollutants through biosorption-an overview[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2012, **40**(1): 16-23.
- [7] Jha V N, Tripathi R M, Sethy N K, *et al.* Uptake of uranium by aquatic plants growing in fresh water ecosystem around uranium mill tailings pond at Jaduguda, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **539**: 175-184.
- [8] Khani M H. Dynamics and thermodynamics studies on the lead and cadmium removal from aqueous solutions by *Padina* sp. algae; studies in single and binary metal systems[J]. *Separation Science and Technology*, 2013, **48**(17): 2688-2699.
- [9] 胡恋, 谢水波, 张晓健, 等. 微生物吸附处理低浓度含铀废水的效能[J]. *安全与环境学报*, 2007, **7**(2): 57-60.
- [10] Keshtkar A R, Mohammadi M, Moosavian M A. Equilibrium biosorption studies of wastewater U(VI), Cu(II) and Ni(II) by the brown alga *Cystoseira indica* in single, binary and ternary metal systems [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, **303**(1): 363-376.
- [11] Riazi M, Keshtkar A R, Moosavian M A. Batch and continuous fixed-bed column biosorption of thorium (IV) from aqueous solutions; equilibrium and dynamic modeling [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, **301**(2): 493-503.
- [12] Aytas S, Gunduz E, Gok C. Biosorption of uranium ions by marine Macroalga *Padina pavonia* [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, **42**(4): 498-506.
- [13] Erkaya I A, Arica M Y, Akbulut A, *et al.* Biosorption of uranium (VI) by free and entrapped *Chlamydomonas reinhardtii*; kinetic, equilibrium and thermodynamic studies[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, **299**(3): 1993-2003.
- [14] Khani M H. Statistical analysis and isotherm study of uranium biosorption by *Padina* sp. algae biomass [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(5): 790-799.
- [15] 胡洪营, 李鑫, 杨佳. 基于微藻细胞培养的水质深度净化与高价值生物质生产耦合技术[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 1122-1127.
- [16] 李鑫, 胡洪营, 张玉平. 无机碳源对栅藻 LX1 生长及油脂积累特性的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2260-2266.
- [17] Keshtkar A R, Hassani M A. Biosorption of thorium from aqueous solution by Ca-pretreated brown algae *Cystoseira indica* [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2014, **31**(2): 289-295.
- [18] Singhal R K, Basu H, Pimple M V, *et al.* Spectroscopic determination of U(VI) species sorbed by the *Chlorella* (*Chlorella pyrenoidosa*) fresh water algae [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, **298**(1): 587-592.
- [19] Moghaddam M R, Fatemi S, Keshtkar A. Adsorption of lead (Pb^{2+}) and uranium (UO_2^{2+}) cations by brown algae; experimental and thermodynamic modeling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **231**: 294-303.
- [20] Bai J, Yao H J, Fan F L, *et al.* Biosorption of uranium by chemically modified *Rhodotorula glutinis* [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, **101**(11): 969-973.
- [21] 李鑫. 污水深度脱氮除磷与微藻生物能源生产耦合技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2011. 19.
- [22] 余骏一. 基于微藻的含铀废水生物处理技术研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2014. 18.
- [23] Wang B, Li Y Q, Wu N, *et al.* CO₂ bio-mitigation using microalgae[J]. *Applied Microbiological Biotechnology*, 2008, **79**(5): 707-718.
- [24] Jiménez-Pérez M V, Sánchez-Castillo P, Romera O, *et al.* Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, **34**(5): 392-398.
- [25] Kalin M, Wheeler W N, Meinrath G. The removal of uranium from mining waste water using algal/microbial biomass [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005, **78**(2): 151-177.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@cees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@cees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行