

水生植物大藻和凤眼莲对水中铀的去除

聂小琴¹, 丁德馨^{2,*}, 董发勤¹, 刘 宁³, 张 东⁴, 李广悦², 刘明学¹

1. 西南科技大学 核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010;

2. 南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 湖南 衡阳 421001;

3. 四川大学 原子核科学技术研究所 辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064;

4. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要:通过室内水培和静态吸附实验,研究了铀矿区土著水生植物大藻(*Pistia stratiotes* L.)和凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)对真实铀矿坑水和不同铀浓度水中铀的去除能力。结果表明:干体大藻和凤眼莲根系以 1 g/L(干重)的比例投加至铀矿坑水($\rho_0(\text{U})=1.93 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_0=7.83$)中,1 h 后,矿坑水中铀去除率分别达 58%和 48%,5 d 后铀质量浓度降至 0.3 mg/L 以下;活体大藻和凤眼莲对水体中铀的去除作用主要集中在第 1 d 内,单株鲜重约为 400 g 左右的活体大藻在 10 min 内可以将 1 L $\rho_0(\text{U})=0.045\sim 4.5 \text{ mg/L}$ 的水体中铀质量浓度降至 30 $\mu\text{g/L}$ 以下,符合世界卫生组织建议的饮用水标准;单株鲜重约为 400 g 左右的活体凤眼莲在 1 d 内可以将 1 L $\rho_0(\text{U})=0.5\sim 4.5 \text{ mg/L}$ 的水体中铀质量浓度降至国家标准(GB 23727—2009)规定值(0.05 mg/L)以下。

关键词:大藻;凤眼莲;铀;植物修复

中图分类号:X171 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2015)04-0243-07

doi:10.7538/hhx.2015.37.04.0243

Uranium Removal From Water by *Pistia Stratiotes* L. and *Eichhornia Crassipes*

NIE Xiao-qin¹, DING De-xin^{2,*}, DONG Fa-qin¹, LIU Ning³, ZHANG Dong⁴,
LI Guang-yue², LIU Ming-xue¹

1. Fundamental Science on Nuclear Wastes and Environmental Safety Laboratory,
Southwest of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Fundamental Science on Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy,
University of South China, Hengyang 421001, China;

3. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education,
Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

4. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract: Laboratory hydroponic and static adsorption experiments were conducted on the uranium removal by *Pistia stratiotes* L. and *Eichhornia crassipes* from the real uranium mine

收稿日期:2014-06-23;**修订日期:**2015-03-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划,2014CB846003);国家自然科学基金项目(No. 91126013);国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合基金项目(No. 11176028);核废物与环境安全国防重点学科实验室开放基金项目(No. 12zxnp02)

作者简介:聂小琴(1985—),女,四川安县人,博士,助理研究员,核燃料循环与材料专业

*** 通信联系人:**丁德馨(1958—),男,湖南益阳人,教授,采矿工程专业,E-mail: dingdxzzz@163.com

pit water and the solution which contained different initial uranium concentration. The removal rate of uranium could reach 58% and 48% by 1 g/L of the dried root biomass of *Pistia stratiotes* L. and *Eichhornia crassipes* from the real uranium mine pit water (the initial uranium mass concentration was 1.93 mg/L and the initial pH value was 7.83) in 1 h, respectively. After 5 d, the uranium mass concentration could reduce to below 0.3 mg/L. The uranium removal was rapid by the living *Pistia stratiotes* L. and *Eichhornia crassipes* which could remove more than 95% of total removal rate taking place in 1 d. Only 10 min was required for the *Pistia stratiotes* L. which has 400 g fresh weight per individual plant with the initial uranium mass concentration in water of 0.045-4.5 mg/L to reduce to below the standards of the world health organization (30 $\mu\text{g/L}$). Then 1 d was required for the *Eichhornia crassipes* which has 400 g fresh weight per individual plant with the initial uranium mass concentration in water of 0.5-4.5 mg/L to reduce to below the national emission standards of China (0.05 mg/L).

Key words: *Pistia stratiotes* L.; *Eichhornia crassipes*; uranium; phytoremediation

近年来,国内外学者在铀污染水体的植物修复以及利用天然生物质材料作为吸附剂处理含铀废水方面开展了大量的研究^[1-10],并取得了许多重要的进展。植物吸收铀的速率不仅受环境因素(如生长介质中铀的供应水平、温度、pH 值等)的影响,而且与植物的生长发育状况(如生育期和代谢强度等)密切相关,这些因素之间的关系错综复杂,共同影响着植物对铀的吸收和积累。有研究表明,活体大藻和凤眼莲具有极强的铀吸收能力^[1]。大藻(*Pistia stratiotes* L.)和凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)分属天南星科和雨久花科多年生浮水草本植物,是两种生物量大、生长繁殖快、分布广泛、净化水体能力强、在铀矿区污染水体中大量存在的土著水生植物。同时,满江红^[3]、浮萍^[6]、向日葵和大豆^[7]、藻类^[9]等多种水生和陆生植物对水体中铀的净化性能均被国内外学者研究。为了拓展植物修复技术应用的地域性和实效性,陈同斌等^[11]研发了利用砷超富集植物蜈蚣草离体羽叶吸收污水中砷的净化技术和装置,对水体中砷的去除效果较为理想。而关于优势铀吸收植物在活体和离体状态下对铀污染水体的净化效果和性能的比较研究未见报道。因此,本工作拟从接触时间(短期和长期)、投加方式(离体和活体)两个方面考察土著水生植物大藻和凤眼莲对水体中铀的去除能力,以期将植物修复技术应用于铀污染水体的深度净化提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

在我国南方郊外农家池塘采集了长势良好的

水生植物大藻和凤眼莲,池塘本底铀质量浓度为 45 $\mu\text{g/L}$ 。植物经自来水反复清洗后,挑选个体均匀的植株进行活体实验。离体实验分为干体和鲜体,将挑选出的植株根系和秆叶分开,剪碎(长度约为 0.5~2 cm),作为鲜体实验材料;将分剪为根系和茎叶的植物组织置于 70 $^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中烘至恒干,收集作为干体实验材料。

铀矿坑水取自我国南方某铀矿,初始铀质量浓度为 1.93 mg/L,初始 $\text{pH}_0=7.83$ 。试验所用 HF 和 HNO_3 均为优级纯,经亚沸蒸馏器蒸馏纯化处理;所用水为超纯水,电导率为 18.4 S/m。

铀标准溶液的配制:准确称取预先干燥恒重的标准铀试剂八氧化三铀(中国核工业集团公司二七二厂提供)1.179 2 g,经混酸溶解后定容至 1 000 mL,即得到 1 g/L 的铀标准溶液。通过稀释得到本实验设置的 0.045~9 mg/L 铀溶液浓度范围(常见含铀废水中铀质量浓度在 0.5~10 mg/L 之间)。用 10 g/L 碳酸钠碳酸盐和 5 g/L 的碳酸氢钠缓冲溶液分别调 pH 为 5.8。

Mettler AE 240 型电子天平,精度为十万分之一,瑞士 METTLER 公司;FY130 植物粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;ELAN DRC-e ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪,美国 Perkin Elmer 公司;Milli-Q Element 超纯水制备系统,日本 Millipore 公司;亚沸蒸馏器,金坛市精达仪器制造厂。

1.2 实验方法

离体实验:在 2 L 的烧杯中加入 1 L 铀矿坑水,分别投加 1 g 干体(干重)或者 10 g 鲜体(鲜

重)植物,磁力搅拌器间断搅拌(每隔 0.5 h 以 150 r/min 的转速搅拌 5 min),在短期(1、4、8、12、24 h)和长期(1、2、3、4、5 d)不同时间点取水样分析残余铀浓度,研究离体供试植物对铀矿坑水中铀的去除效果。每个实验设 3 个平行组。

活体实验:在 2 L 烧杯中分别加入 1 L 铀初始质量浓度为 0.045 (对照组)、0.5、1.5、4.5、9 mg/L 铀溶液,然后分别投加 1 株鲜重约 400 g 的大藻和凤眼莲。在短期(10 min、1 h、6 h、12 h、24 h)和长期(1、2、3、4、5 d)不同时间点取水样分析残余铀浓度。每个实验设 3 个平行组。5 d 后,测植物的鲜重和体内铀浓度。

根据下式计算铀的去除率。

$$R = \frac{\rho_0(U) - \rho(U)}{\rho_0(U)} \times 100\%$$

其中: R 为铀的去除率; $\rho_0(U)$ 为初始铀质量浓度, $\rho(U)$ 为 t 时刻的铀质量浓度,单位均为 mg/L。

1.3 分析方法

植物样品根部用流动的自来水冲洗 10 min,再用去离子水冲洗 3 次,经吸水纸吸干表面水分。称量鲜重后,剪碎,于 105 ℃ 的烘箱内保持 30 min,

然后在 70 ℃ 下烘至恒干,粉碎过 40 目筛,称量干重,600 ℃ 灰化 10 h,混酸消解,定容待测。

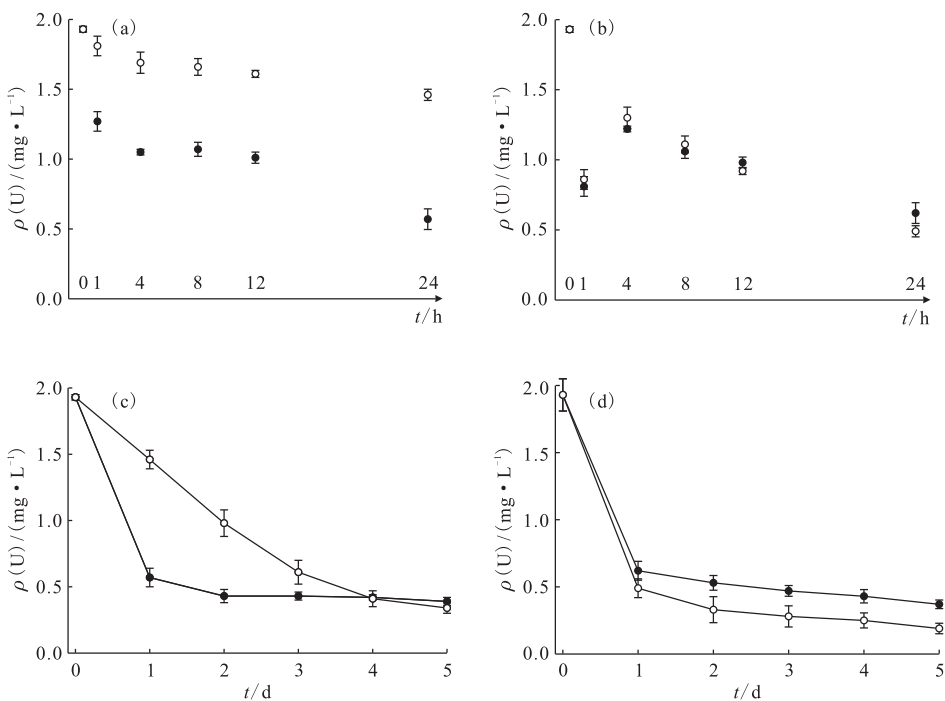
水样和植物样品中铀含量的测定采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS 测定(铀的检出限为 0.001 mg/L)。

2 结果和讨论

2.1 离体大藻和凤眼莲对铀矿坑水中铀的去除作用

在投加离体大藻和凤眼莲 48~72 h 后,鲜体和干体先后在铀矿坑水中产生异味。干体茎叶和鲜体茎叶及根系先后在 1 h 和 72 h 时使铀矿坑水由无色呈现出黄绿色。干体根系在矿坑水中始终无色。离体大藻和凤眼莲对铀矿坑水中铀的去除作用随时间的变化分别示于图 1 和图 2。

由图 1 和图 2 可以看出:随着作用时间的延长,矿坑水中铀的去除率随着离体大藻和凤眼莲作用时间的延长而增加,在分别投加 10 g(鲜重)鲜体或 1 g(干重)干体离体大藻/凤眼莲至 1 L (V_0) 铀质量浓度($\rho_0(U)$)为 1.93 mg/L 的矿坑水中 1 h 后,大藻鲜体茎叶和根系对矿坑水中铀去

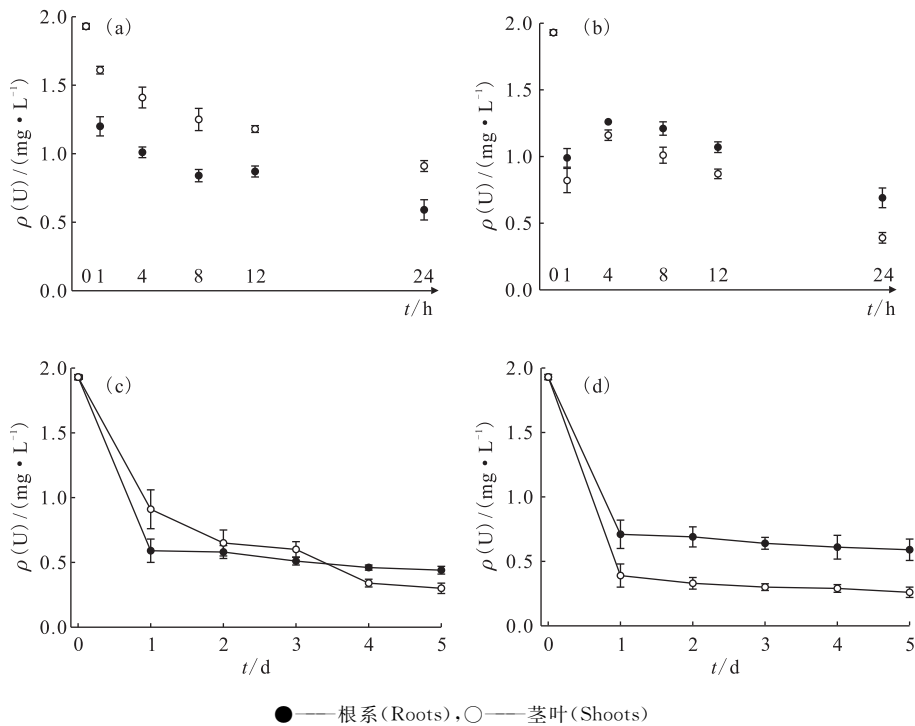


$V_0 = 1 \text{ L}$, $m_0(\text{鲜(Fresh)}) = 10 \text{ g}$, $m_0(\text{干(Dried)}) = 1 \text{ g}$, $t = 1 \sim 5 \text{ d}$, $\rho_0(U) = 1.93 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_0 = 7.83$ (下同 (Similarly herein after the same below))

● — 根系 (Roots), ○ — 茎叶 (Shoots)
(a), (c) — 鲜体 (Fresh), (b), (d) — 干体 (Dried)

图 1 离体大藻对铀矿坑水中铀的去除作用

Fig. 1 Effect of uranium removal from uranium mine water by the biomass of *Pistia stratiotes* L.



●——根系(Roots),○——茎叶(Shoots)
(a)、(c)——鲜体(Fresh),(b)、(d)——干体(Dried)

图 2 离体凤眼莲对铀矿坑水中铀的去除作用

Fig. 2 Effect of uranium removal from uranium mine water by the biomass of *Eichhornia crassipes*

除率分别为 6%、34%，凤眼莲鲜体茎叶和根系对矿坑水中铀去除率分别为 17%、38%，比同期大藻对铀的去除率高；大藻干体茎叶和根系对矿坑水中铀去除率分别为 56%、58%，凤眼莲干体茎叶和根系对矿坑水中铀去除率分别为 57%、48%。到 5 d 时，铀去除率均达到最高，离体-鲜体大藻茎叶和根系分别为 79%、78%，离体-干体大藻茎叶和根系分别为 90%、71%；离体-鲜体凤眼莲茎叶和根系分别为 84%、77%，离体-干体凤眼莲茎叶和根系分别为 85%、70%。茎叶比根系表现出更强的净化作用，其中大藻干体茎叶体系矿坑水中铀的残余质量浓度为 0.19 mg/L，凤眼莲干体和鲜体茎叶体系矿坑水中铀的残余质量浓度分别为 0.30 mg/L 和 0.26 mg/L，符合我国《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》废水排放口(有稀释源)铀浓度限值(0.30 mg/L，GB 23727—2009)。此外，由图 1(b)和图 2(b)可以看出，从 10 min~1 h，矿坑水中铀的浓度有回升的趋势，推测离体-干体大藻和凤眼莲在短时间内主要通过静电作用物理吸附，对铀矿坑水中铀有很好的去除效果，但作用并不稳定。其余实验组在监测的 5 d 内，未出现铀反溶现象。

Bhat 等^[9]利用一种红藻干体作为生物吸附

剂，开展了其对水体中铀吸附性能研究，结果表明，当溶液中 pH=7.5 时，水体中铀的去除率仅为 14%±1%，在相同投加量的条件下，本研究中大藻和凤眼莲根系和茎叶干体对铀矿坑水中的铀去除率在 48%~58%，明显优于红藻干体。pH 值是影响生物对铀吸附的重要因素之一，溶液中 pH 值的变化可改变吸附剂材料表面电荷和溶液中铀的化学形态，从而影响吸附材料对铀的吸附能力^[10]。当 pH 值为 4~5 时溶液中 U(VI)主要以 UO_2^{2+} 存在， UO_2^{2+} 因静电吸引力将与带负电荷的吸附剂表面快速接近。随着 pH 值增高， UO_2^{2+} 逐渐发生水解以 $[(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5]^+$ 等络阳离子形式存在，离子半径较大的络合离子导致与吸附剂表面的活性位点结合数量减少，当 pH>6 后， $[(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_7]^-$ 、 $[\text{UO}_2(\text{OH})_3]^-$ 等络阴离子逐渐成为溶液中铀的主要物种。这些络合阴离子与吸附剂表面的负电荷产生静电斥力，导致吸附率逐渐下降。本研究中铀矿坑水的 pH 值为 7~8，此时铀在溶液中主要以碳酸铀酰络合阴离子的形式存在，水体中共存的碳酸根等阴离子将与碳酸铀酰络合阴离子竞争吸附剂表面的活性结合位点，降低铀的吸附率。理论上，若通过干体材料改性或者对矿坑水的 pH 值进行调节预处理，

将 pH 值调节至 4~5,铀的去除率还有大幅度提升的潜质。

陈同斌等^[11]研究发现蜈蚣草羽叶对砷的去除率最高可达 33.5%。本研究中大藻和凤眼莲的干体茎叶和根系($V(\text{水}):m(\text{植物})=500:1$)在投加至铀质量浓度为 1.93 mg/L 的铀矿坑水中间歇搅拌(每 30 min 搅拌 1 次,每次搅拌 5 min),在 10 min~1 h,水体中铀的浓度出现回升的趋势。整个过程中干体大藻和凤眼莲茎叶对铀的去除率最高分别可达 90%、85%。文献[12]报道了一种经济、高效、操作简单、耗时少、适用地域广且对环境安全、友好的利用凤眼莲根须氧化并吸附去除水体中 As(Ⅲ)的方法。本工作结果表明,凤眼莲对水体中的铀(VI)同样有良好地去除功能,茎叶效果优于根系。大藻的干体茎叶,凤眼莲的干体和鲜体茎叶的加入比例约为铀矿坑水质量 1/500(以干重计)的条件下,5 d 可使铀矿坑水的铀浓度有效减至国家标准 GB 23727—2009

中规定的铀矿冶废水排放口处有稀释源的铀浓度限值(0.30 mg/L),表明大藻和凤眼莲的茎叶部分可作为备选的生物质吸附剂应用于铀污染水体的净化中。关于水体中的铀(VI)与离体大藻和凤眼莲作用的过程中,是否发生还原作用,有待进一步研究。

2.2 活体大藻和凤眼莲对铀矿坑水中铀的去除作用

水体中残余铀浓度随活体大藻和凤眼莲作用时间变化示于图 3 和图 4。由图 3、4 可知,生物量约为 400 g/株(鲜重)的大藻和凤眼莲对初始铀质量浓度为 0.045~9 mg/L 溶液中铀的去除作用非常明显。

由图 3(a)可以看出:投加活体大藻 10 min 后,溶液中铀的去除率均高于 60%,12 h 后,铀去除率均高于 90%,1 d 之后,铀去除率均达到 94%以上,残余铀质量浓度分别仅为 20.4、28.5、61.3、320.2、580.1 $\mu\text{g/L}$ 。大藻可在 10 min 内将

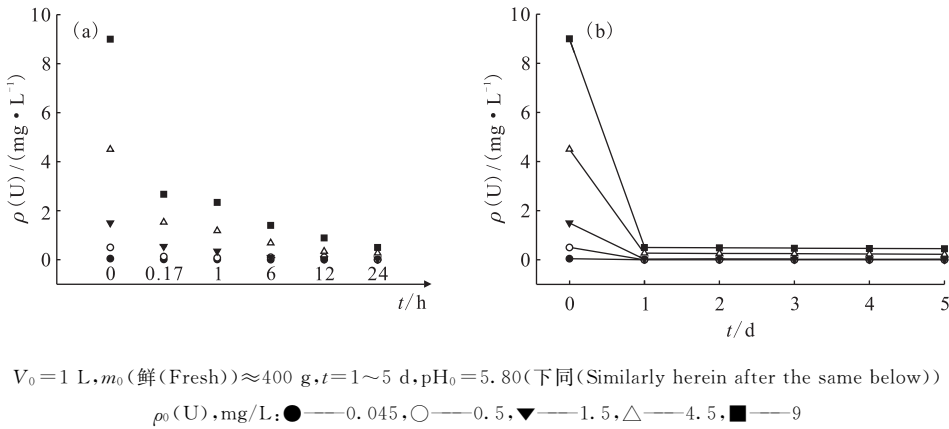


图 3 大藻对不同浓度铀溶液中铀的去除作用

Fig. 3 Effect of initial uranium concentration on uranium removal by *Pistia stratiotes* L.

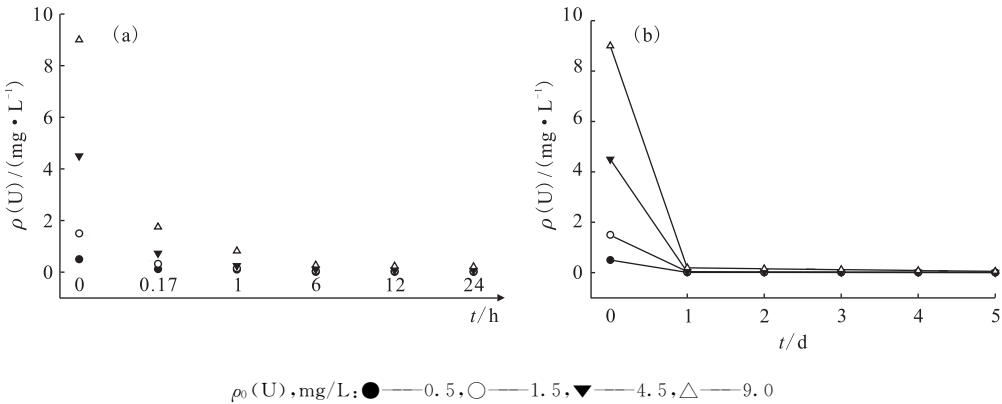


图 4 凤眼莲对不同浓度铀溶液中铀的去除作用

Fig. 4 Effect of initial uranium concentration on uranium removal by *Eichhornia crassipes*

初始铀质量浓度为 0.045~0.5 mg/L 的溶液中铀质量浓度降至 30 $\mu\text{g/L}$ 以下,符合世界卫生组织建议的生活饮用水限定铀浓度 (30 $\mu\text{g/L}$)。从图 3(b)可以看出:大藻对水体中铀的去除作用主要集中在第 1 d,之后的 5 d 内溶液中铀浓度基本不再下降,也未出现反溶趋势。

从图 4 可以看出,在 0~24 h 之间,1 L 初始铀质量浓度分别为 0.5、1.5、4.5、9 mg/L 的溶液在一株活体凤眼莲(鲜重约 400 g)作用下,溶液中铀浓度均迅速下降,投加 10 min 后,不同初始铀浓度水中铀的去除率均达 75% 以上,12 h 后,铀去除率均高于 94%,24 h 时各组溶液中残余铀质量浓度分别为 0.01、0.03、0.04、0.19 mg/L,去除率均高于 98%,5 d 后,铀去除率均高于 99%。由此可见,凤眼莲对初始铀质量浓度在 0.5~4.5 mg/L 的水体,在 1 d 内,即可将其浓度降低至国家排放标准(GB 23727—2009)规定的 0.05 mg/L 以下。

5 d 后取植物样分析,结果表明,大藻根系和茎叶部分对铀的富集量随溶液中初始铀浓度的增加而增加。其中根系铀平均含量在 7.93~3 831.63 mg/kg(干重),茎叶铀平均含量在 0.59~50.64 mg/kg(干重)。各组生物量(鲜重)较实验前均有 10% $\pm$ 2% 的增加。与无铀对照组相比,生物量无显著性差异。

张小枝等^[3]的研究结果表明,满江红鱼腥藻对质量浓度低于 5.5 mg/L 的铀吸附迅速,平衡时间不超过 2 min,属于生物物理吸附过程。本研究中活体大藻和凤眼莲对 0.5~4.5 mg/L 的铀溶液吸附作用也很快,10 min 即可完成 60% 以上的吸附量,在 24 h 逐渐趋于平衡,在 5 d 内即使水体中铀浓度极低的情况下也未出现反溶,表明活体大藻和凤眼莲与水体中铀的作用过程在初始阶段以被动的物理吸附为主,随后伴有主动的化学反应和生物代谢过程的参与。

铀污染水体的植物修复技术主要采用植物提取和根际过滤的形式^[4],目前尚未大面积推广,研究工作大多局限在温室研究阶段,只有少数国外研究人员开展了在中试范畴的试验。Pratas 等^[5]报道了生长在葡萄牙中部的的水生植物块根芹(*Apium nodiflorum*)、水马齿(*Callitriche stagnalis*)、浮萍(*Lemna minor*)和莫丝草(*Fontinalis antipyretica*)对铀具有显著的积累能力,而毒芹(*Oenanthe crocata*)却抑制了铀的吸收。Mkan-dawire 等^[6]通过开展实验室水培与田间盆栽试验

研究了磷和氮对浮萍(*Lemna gibba* L.)积累铀的影响,发现当水溶液中 PO_4^{3-} 质量浓度最大 (40.0 mg/L)时浮萍积累的铀最多,同时开展了利用浮萍修复铀尾矿水中铀和砷,结果表明,在 21 d 实验室稳态测试期间铀积累量 (896.9 ± 203.8) mg/kg,估计在 7 d 内就能将 1 000 L 水中的 U 从 100 $\mu\text{g/L}$ 降低至德国所推荐的周围地表水中限值 30 $\mu\text{g/L}$ 。然而,磷酸根的加入势必带来水体中磷的污染,铀浓度的降低可能是磷酸根与水体中的铀可直接作用,生成难溶的磷酸铀盐沉淀,而未必是浮萍对水体中铀作用的结果。Lee 等^[7]在俄亥俄州 Ashtabula 地区开展了植物处理铀加工厂废水的研究。结果表明,通过向日葵根际过滤系统后的废水,铀质量浓度可以从 21~874 $\mu\text{g/L}$ 降至 20 $\mu\text{g/L}$ 以下,直接达到美国环境保护署(EPA)规定的水中铀质量标准。与大型的陆生植物和生物量较小的漂浮水生植物(如浮萍)相比,本研究中选用的铀矿坑水中的土著水生植物大藻和凤眼莲在生物量、铀的去除能力和推广应用的便利程度方面,都表现出明显的优势。同为生物量大,繁殖速度快的大藻和凤眼莲,选用合适的个体(单株生物量鲜重约为 400 g),可在 1 d 内将 2 L 水中铀质量浓度从 4.5 mg/L 降至国家排放标准(GB 23727—2009)规定的 0.05 mg/L 以下。

3 结 论

(1) 将离体-鲜体大藻和凤眼莲茎叶/根系以 10 g/L(鲜重)的比例投加至铀矿坑水($\rho_0(\text{U}) = 1.93 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_0 = 7.83$)中,随着时间由 1 h 延长至 5 d,铀去除率从 6% 增加至 84%,然而鲜体在水中一定时间后会在水体着色变味。

(2) 将离体-干体大藻和凤眼莲茎叶和根系以 1 g/L(干重)的比例投加至铀矿坑水($\rho_0(\text{U}) = 1.93 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_0 = 7.83$)中,1 h 后,矿坑水中铀去除率均在 48% 以上,随着时间的延长,去除率逐级增加。干体根系在矿坑水中 5 d 后,水体仍保持无色无味。综合考虑修复效果、二次污染、经济可行等因素,可以通过反复多次投加/打捞离体-干体大藻和凤眼莲根系来净化铀矿坑水。

(3) 活体大藻和凤眼莲水体中铀的去除作用主要集中在第 1 d 内;1 株鲜重约为 400 g 左右的活体大藻在 10 min 内可以将 1 L $\rho_0(\text{U})$ 为 0.045~4.5 mg/L 的水体中铀质量浓度降至 30 $\mu\text{g/L}$ 以

下,符合世界卫生组织建议的饮用水标准;1 株鲜重约为 400 g 左右的活体凤眼莲在 1 d 内可以将 1 L $\rho_0(\text{U})$ 为 0.5~4.5 mg/L 的水体中铀浓度降至国家标准(GB 23727—2009)规定值(0.05 mg/L)以下。

参考文献:

- [1] 丁德馨,高斌,李广悦,等. 一种铀污染水体的植物修复方法:中国,200910226272[P]. 2009-11-27.

[2] Favas P J, Pratas J, Varun M, et al. Accumulation of uranium by aquatic plants in field conditions: prospects for phytoremediation[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 470-471: 993-1002.

[3] 张小枝,罗上庚,杨群,等. 满江红鱼腥藻吸附低浓度铀的研究[J]. *核化学与放射化学*, 1998, 20(2): 114-118.

[4] 张学礼,王尔奇. 环境中铀污染的植物修复[J]. *铀矿冶*, 2008, 27(1): 44-49.

[5] Pratas J, Paulo C, Favas P J C, et al. Potential of aquatic plants for phytofiltration of uranium-contaminated waters in laboratory conditions[J]. *Ecol Eng*, 2014, 69: 170-176.

[6] Mkandawire M, Taubert B, Dudel E G. Resource manipulation in uranium and arsenic attenuation by *Lemna gibba* L. (duckweed) in tailing water of a former uranium mine[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2005, 166: 83-101.
- [7] Lee M, Yang M. Rhizofiltration using sunflower (*Helianthus annuus* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L. var. *vulgaris*) to remediate uranium contaminated groundwater[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 173(1-3): 589-596.

[8] Li J, Zhang Y. Remediation technology for the uranium contaminated environment; a review[J]. *Procedia Environ Sci*, 2012, 13: 1609-1615.

[9] 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]. *J Hazard Mater*, 2008, 158(2-3): 628-635.

[10] Kaplan M, Wheeler W N, Meinrath G. The removal of uranium from mining waste water using algal/microbial biomass[J]. *J Environ Radioacti*, 2005, 78 (2): 151-177.

[11] 陈同斌,阎秀兰,陈阳,等. 一种砷污染水体修复方法和装置:中国,CN 1935699A[P]. 2007-03-28.

[12] 郑建中,陈建,王静,等. 利用凤眼莲根须氧化并吸附水体中 As(Ⅲ)的方法:中国,CN 101100325A[P]. 2008-01-09.