

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0089

滕彦国, 胡竞丹, 郑富新, 等. 铀矿区地下水污染治理与修复技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 886-901.
TENG Y G, HU J D, ZHENG F X, et al. Advances in groundwater pollution treatment and remediation technologies in uranium mining areas[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 886-901. (in Chinese)

铀矿区地下水污染治理与修复技术研究进展

滕彦国^{1,2}, 胡竞丹¹, 郑富新¹, 豆俊峰¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要:在总结近年来国内外铀矿区地下水污染治理与修复技术最新进展和已有成果的基础上, 评述物理化学修复技术, 生物修复技术及可渗透反应墙技术基本理论、实际案例和未来发展前景。当前铀矿区地下水污染的原位治理与修复技术以实验室研究为主, 缺乏对实际铀矿区地下水污染治理与修复的工程实践, 如何结合实际铀矿区水文地质条件和污染特征开发绿色、高效、低碳的治理与修复技术, 是未来铀矿区地下水污染治理修复的重要发展方向。

关键词:铀矿区; 地下水污染; 治理修复技术; 研究进展

中图分类号: TV211.1; P641 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



铀是重要的战略资源, 也是全球重要的能源原料, 在核工业发展中具有举足轻重的地位。在碳达峰、碳中和目标下, 核能因技术成熟、持续供电能力强、环境友好备受世界各国重视, 是 21 世纪具有良好发展前景的安全、清洁、可靠能源^[1-2]。根据《国家核电发展专题规划(2005—2020年)》, 2020 年核电占全部电力装机容量的比重提高到 4%, 核电年发电量达到 2 600 亿~2 800 亿 kW·h。预计到 2030 年和 2050 年, 核电将分别占我国电力生产的 15% 和 22%^[3]。2020 年我国铀产量约 1 885 t, 2025 年国内需求预计可达到 1.85 万 t, 到 2030 年将达到 2.01 万~2.40 万 t^[4], 国内铀资源的需求将持续增加。

铀矿资源开发在满足日益增长的能源需求的同时也带来了许多环境问题, 如固体废物污染、放射性氡气污染和废水污染等。此外, 由于核污染事故的发生造成环境污染并使公众受到辐射危害, 如 1986 年的苏联切尔诺贝利核事故、2011 年的日本福岛核事故, 这些都引发了全球对核安全及放射性

污染的极大关注。铀作为放射性核素, 具有高放射性、毒性强的特点, 会进入环境以及食物链导致在生物体内富集。其释放的 α 射线会对人体器官造成放射性辐射伤害, 其化学毒性会引起慢性甚至急性中毒, 对人体的造血器官、消化系统、生殖系统和神经系统造成不同程度损伤, 对人类健康和环境造成长期潜在的威胁^[5]。世界各国为有效管理环境中铀的剂量及进行污染治理, 制定了一系列标准, 见表 1。

地下水是我国居民主要的饮用水来源之一, 相较于其他类型污染的铀污染, 地下水铀污染的空间范围更广, 产生的环境暴露与健康风险也更高。因此, 研究新型、高效的地下水铀污染治理与修复技术已成为现代核工业和环境领域共同研究的热点, 具有重大的现实意义。本文通过对国内外铀矿区地下水污染现状和修复技术的文献调研, 分析铀矿区铀污染对地下水环境的影响, 重点评述物理化学、渗透反应墙(permeable reactive barrier, PRB)及生物

收稿日期: 2022-04-19 修回日期: 2022-08-10 网络出版时间: 2022-09-30

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220926.1856.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1806604); 北京市高精尖学科-陆地表层学项目

作者简介: 滕彦国(1974—), 男, 黑龙江巴彦人, 教授, 博士, 主要从事水文地球化学研究。E-mail: teng1974@163.com

通信作者: 胡竞丹(1999—), 女, 吉林辽源人, 主要从事地下水污染修复研究。E-mail: hujd@mail.bnu.edu.cn

的地下水环境修复技术研究现状,并对铀矿区地下水修复技术的发展进行展望。

1 铀矿区地下水污染状况

铀矿开采、加工和水冶过程中,铀会通过多种途径进入地下水导致地下水污染,直接或间接地对环境产生影响。同时,铀被氧化后进入地下水环境中,常以铀酰离子(UO_2^{2+})形态存在, UO_2^{2+} 能和其他阳离子(如 Ca^{2+} 等)以及磷酸根、碳酸根、硫酸根等形成各种盐类化合物^[17]。地下水中铀的化学形态与水环境行为主要受离子类型、离子强度、酸碱度、氧化还原条件等因素的影响^[18]。图1表示了铀的总浓度为 10^{-6} mol/L,二氧化碳分压为 10^{-2} atm,体系温度为 $25^\circ C$ 时, $U(VI)$ 在溶液中的形态分布以及铀的 Eh 值与 pH 值的关系。

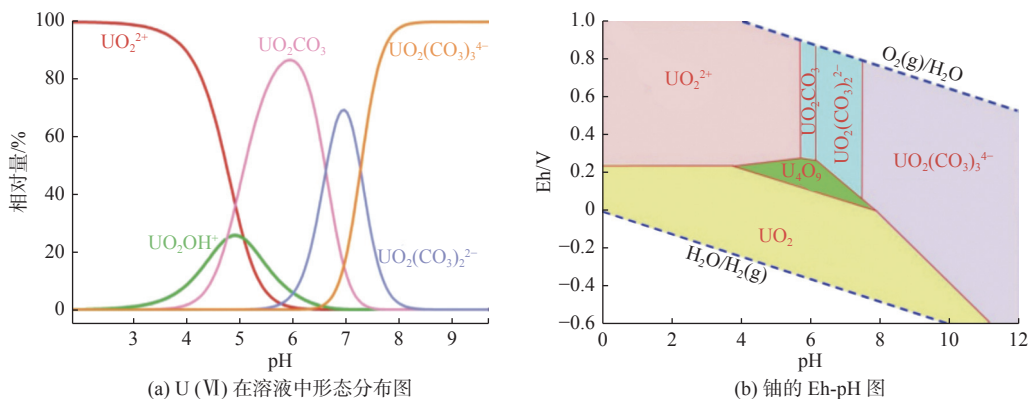


图1 U(VI)在溶液中形态分布图和铀的 Eh-pH 图^[19]

Fig. 1 Distribution diagram of U(VI) species in solution and Eh-pH diagram of uranium^[19]

注:作为 $U-CO_2-H_2O$ 体系中 pH 的函数,总铀浓度 10^{-6} mol/L,二氧化碳分压 10^{-2} atm,体系温度 $25^\circ C$;虚线表示水的稳定范围的极限。

地下水中铀的来源可以受自然或人为过程的影响,国内外部分铀矿区地下水中铀的分布见表2。

自然因素造成的地下水铀污染现象广泛存在于世界各地。首先,含铀岩石的风化作用、淋溶作用及水岩相互作用等自然过程使铀释放进入地下水,引起地下水污染,例如:山西大同盆地由于其沉积岩与沉积物具有较高的铀含量,造成了该区域地下水中铀质量浓度偏高^[20];河套盆地地下水部分样品中铀质量浓度偏高^[21];在美国加利福尼亚高平原和中央山谷地区,地下水中的硝酸盐会造成矿物中铀的溶解与释放,导致地下水的铀污染,局部铀质量浓度分别高达 $2\ 674\ \mu g/L$ 和 $5\ 400\ \mu g/L$ ^[22]。其次,花岗岩型铀矿是铀的主要矿床类型,该类矿床及周边区域地下水往往具有较高的铀含量,如:布隆迪某地下水蒸发强烈的花岗岩地区,地下水中铀质量浓度高达 $700\ \mu g/L$ ^[23];印度拉贾斯坦邦和古吉拉特邦

表1 国际上地下水中铀的监管限值

Tab. 1 Internationally regulated limits for uranium in groundwater

国家/组织	质量浓度限值 /($\mu g \cdot L^{-1}$)	参考文献
世界卫生组织(WHO)	30	[6]
澳大利亚	17	[7]
巴西	30	[8]
加拿大	20	[9]
德国	10	[10]
日本	2	[11]
印度	60	[12]
新西兰	20	[13]
俄罗斯	1 700	[14]
瑞士	30	[15]
美国	30	[16]

花岗岩型铀矿周边的 121 座饮用水井中有 45 座存在铀污染现象^[24]。最后,与花岗岩型铀矿床相比,砂岩型铀矿床是近年来开发利用较多的铀矿资源,砂岩型铀矿床及周边区域地下水也具有较高的铀含量,如德国三叠纪砂岩含水层中存在含铀碳酸盐氟磷灰石同生包裹体,而该物质在风化过程可将铀释放至地下水而导致污染^[25]。

除自然因素外,人类活动是地下水铀污染的另一个主要来源,如铀矿开采、含磷肥施用等^[5]。铀矿的开采、堆浸及尾矿处理过程会产生高浓度含铀废水,如果处置不当,便会造成铀污染,威胁周边的生态环境安全^[44]。针对某铀尾矿周边地下水的研究发现,受矿山开采产生的废石和铀尾矿库堆积的矿砂影响,尾矿库周边地下水铀质量浓度介于 $50 \sim 3\ 360\ \mu g/L$ ^[45];另一项研究发现,某废弃铀矿周围地下水中铀质量浓度高达 $74.05\ mg/L$,远大于美国环境保护署(EPA)

和 WHO 的标准^[46]。此外,含铀煤矿、磷矿的开采活动对地下水中铀的来源有重要贡献。我国煤中铀的平均质量分数约为 2.43 mg/kg,但个别煤矿的铀质量分数甚至超过 200 mg/kg^[47],煤矿开发过程会导致铀释放进入地下水。同时,磷矿的开采过程也可能使铀释放进入水环境,如四川绵远河河水的平均铀质量浓度偏高,可能由沿岸地质因素与磷矿山开发活动共同导致^[48]。另外,施用磷肥是导致农田与地下水中铀含量升高的主要原因,在 1951 年至 2011

年,由于施用磷肥(铀质量分数介于 6 ~ 149 mg/kg),德国农业用地累计释放的铀达到 14 000 t(相当于每 hm^2 含铀 1 kg),造成农用地地下水铀含量比森林地区高 3 倍至 17 倍^[49]。

目前铀污染地下水的治理与修复主流技术主要为物理-化学修复技术、微生物修复技术、植物修复技术和可渗透反应墙技术,每种方法都有其优点以及局限性,详见表 3。

表 2 国内外部分铀矿区地下水铀含量

Tab. 2 Uranium content in groundwater of some uranium mining areas at home and abroad

区域	水体	铀质量浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	参考文献
广东,北部某铀尾矿	下降泉	75.45	[26]
	潜水	9.16	
内蒙古,河套平原	地下水	6.38	[27]
山西,大同盆地	潜水	3.8 ~ 7.2	[28-29]
	浅层承压水	3.5 ~ 6.2	
	深层承压水	0.8 ~ 3.2	
内蒙古,鄂尔多斯盆地	浅层裂隙水	6.27	[30]
	白垩纪承压水	3.53	
	侏罗纪承压水	73.83	
新疆,伊犁盆地	承压含水层	6.20	[31]
	氧化区	2.6 ~ 2.8	
新疆,伊犁盆地-天山西段	过渡带	10 ~ 1200	[32]
	还原区	1.55	
印度,旁遮普省西南部	浅层地下水	318.03	[33]
美国,怀俄明州海兰市	砂岩裂隙水	50	[34]
美国,布尤特县	砂岩裂隙水	92	[34]
澳大利亚,新南威尔士	第四系沉积物潜水	0.001 ~ 2.770	[35]
俄罗斯,泽勒诺戈尔斯克	浅层潜水	0.03 ~ 148.00	[36]
加拿大,安大略省, Bancroft 铀矿	裂隙水	214	[37]
韩国, Icheon 矿区	基岩裂隙水	2.03	[38]
阿联酋, Sabkha 铀矿床	浅层孔隙水	0.004 ~ 70.000	[39]
哈萨克斯坦, Syr Darya 矿区	饮用水和灌溉水	0.54 ~ 63.87	[40]
蒙古, 乌兰巴托地区	地下水	57	[41]
南非, 北开普省	地下水	155	[42]
纳米比亚, 埃龙戈地区	地下水	160	[43]

2 铀矿区地下水污染的物理化学修复技术

铀矿区地下水污染的物理化学修复技术主要包括化学修复技术、电动修复技术和含水层自然衰减等。

化学恢复法一般通过添加化学试剂如磷酸盐(PO_4^{3-})或强还原剂如硫化钠(Na_2S)等化学方法,改

变地下环境以逐渐达到修复目的^[50-51]。Mehta 等^[52]在科罗拉多州一处受六价铀 $[\text{U}(\text{VI})]$ 污染的地下水中注入磷酸盐,以固定尾矿场下受污染的地下水中的铀,并对所取沉积物样品进行的室内试验,结果表明加入磷酸盐后,柱内固定的铀明显增多。另一项利用华盛顿州汉福德 300 地区的沉积物和模拟现

场条件的柱试验研究^[53]发现,随着磷酸盐投入量的增加,含U(VI)的沉积物反应柱中,铀的存留量比不含磷的地下水中的U(VI)高近6倍,并且停止注入磷酸盐后,效果持续了至少1个月。1980年至1986年,美孚石油公司在北马里亚纳群岛进行了地下水污染修复工作,该工作通过恢复地下水水质以使其满足国家地下水标准,修复流程主要是先将地

下水抽至地表,然后利用离子交换和反渗透作用脱盐,中和后将污染物去除,最后向循环水中添加硫化钠(Na_2S)进行化学还原反应,经过6年的时间,地下水质量得到了改善,地下水中铀的平均质量浓度为 0.32 mg/L ^[54]。另外,除了添加还原剂如硫化钠外,还可以通过添加有机基质刺激天然硝酸盐、硫酸盐和金属还原微生物的生长来减少铀和其他成分。

表3 铀污染地下水治理与修复技术优缺点及适用性

Tab. 3 Advantages, disadvantages and applicability of groundwater treatment and remediation technologies for uranium contamination

技术	优点	缺点	适用性
物理-化学修复技术	操作简单,修复效率高,修复效果持久	修复成本高,易破坏场地含水层结构,存在二次污染的问题	适用大面积污染水体修复
微生物修复技术	修复成本低,环境扰动小,操作简单	修复时间长,修复效果不稳定,对环境条件要求高,需要提供营养物质与碳源	适用于污染物易降解,水力变化梯度小的场地
植物修复技术	操作简单,无二次污染,可增加土壤有机质含量以及土壤肥力	对环境条件要求严格,在高污染和肥力贫瘠的污染区域难以实现修复目标	适用于大面积低含量铀污染的场地
可渗透反应墙技术	处理效果好,扰动小,原位持续降解,无需能量输入	反应介质堵塞需要及时更换	对各类场地都有较高适用性

铀矿区地下水污染电动修复技术的原理是在一定电势下,地下水中的铀酰离子接受来自阴极的电子,从而在阴极发生还原反应,使U(VI)还原成四价铀[U(IV)]并以 UO_2 沉淀的形式附着在阴极上,达到从地下水去除U的目的。Kim等^[55]采用电动修复技术治理受铀污染的土壤,在阴极室中电解质的pH值低于2.35的条件下可减少废电解质体积和金属氧化物体积。根据初始铀含量的不同,电动修复时间有所区别,但土壤中铀的去除率均达到95%以上,残余铀的比活度小于 1 Bq/g ,且废电解质在1~3周后可以重新应用。但传统单一的电动修复技术去除效率并不高,现在常利用电动修复技术与其他技术联合修复的方法,如Xiao等^[56]研究了EK-PRB(electrokinetic-permeable reactive barrier)联合修复受U(VI)污染土壤的可行性,7组试验结果表明适当增加土壤实验装置区域内PRB的数量和减小PRB的厚度可以增强对受污染土壤中U(VI)的去除,修复120 h后,去除效率最高($80.58\pm 0.99\%$)。

目前铀矿区地下水污染的物理化学修复技术应用十分有限,将污染的地下水抽出地表经过化学反应处理再回注的方式,处理产物的费用昂贵,且对收集和储存的库址要求高^[57]。另外,回注液中加入的还原剂受地下水流场和化学作用条件的限制,去

除的化学过程如离子交换、反渗透、沉淀作用等实现困难,难以达到处理效果^[58],对于水体中体积大、含盐量高、排放限值低的情况,又很不经济,并且容易破坏场地含水层结构及其理化性质,会对地下水造成二次污染^[5]。

3 铀矿区地下水污染治理的PRB技术

作为一种新兴的地下水原位处理技术,PRB技术在处理成本以及操作难易上相比传统地下水污染处理技术而言具有较大优势。1991年,PRB技术首次应用于实际场地的地下水污染治理,获得理想的处理效果。按去除污染物的机理可将PRB分为吸附型PRB、沉淀型PRB、氧化还原性PRB和生物降解型PRB^[59]。

在国外,采用PRB去除放射性元素的研究与实际运用成果较为丰富。1995年,美国科罗拉多州Bodo Canyon处置场建立了用于处理U、Zn、As、Mo、Se等目标污染物的PRB,2004年6月,铀的质量浓度由最初的 5.54 mg/L 下降至 0.01 mg/L ,达到世界卫生组织的饮用水标准^[60]。美国犹他州水冶尾矿场在1999年安装了零价铁PRB,场地中地下水的铀质量浓度从 $396\text{ }\mu\text{g/L}$ 降至 $0.24\text{ }\mu\text{g/L}$ 以下^[61]。美国科罗拉多州某铀水冶厂2000年安装了零价铁PRB,至2003年场地铀质量浓度从 1.00 mg/L 降至

0.006 mg/L 以下^[62]。2002 年 Simon 等^[63]以碎铁屑为反应介质,安装了连续式 PRB 用以修复铀污染地下水并获良好效果。2004 年 Groudev 等^[64]在保加利亚西部安装了以牛粪肥、木屑、沸石、石灰岩、硫酸盐还原菌以及微生物等混合物为反应介质的连续式 PRB,并用以处理地下水铀污染,运行期间 PRB 去除铀效果较好。我国对 PRB 技术的研究起步较晚,实地应用较少。徐乐昌等^[65]在我国西南某铀矿尾矿堆安装 PRB 进行地下水修复,经过 4 个多月的运行,使得地下水的 pH 由酸性变为中性,铀质量浓度也从 12.21 mg/L 下降到 0.003 mg/L。

PRB 技术的应用需开展 PRB 反应介质材料的开发,墙体结构与规模设计等工作。常用的 PRB 反应介质为零价铁^[66],此外,铁的氧化物和氢氧化物、活性炭、沸石、黏土矿物、树脂、石灰石、锯屑、黑麦籽等也可用作反应介质^[67]。高芳^[68]通过选用还原铁粉(Fe^0)、羟基磷灰石、纳米零价铁和纳米零价铁复合物 4 种活性材料,用于 PRB 中处理含 U(VI) 污染的地下水,结果表明,在相同条件下,羟基磷灰石与另 3 种材料相比,对铀的去除率达到 95%,效果最好。刘宸等^[69]通过研究 pH 为 4.5 时沸石负载纳米零价铁复合材料对 U(VI) 的去除效果中发现,

复合材料增加 Fe^0 反应活性位点,促进还原沉淀反应的进行,且复合材料比表面积与单介质相比显著增大,有利于吸附水溶液中 U(VI)。

PRB 技术虽然较早广泛应用于修复治理地下水污染问题并取得了一定的修复效果,但是仍存在一些影响 PRB 运行的长效性,如介质材料的选择、反应介质材料堵塞以及地下水环境复杂等。

4 铀矿区地下水污染的生物修复技术

4.1 微生物修复技术

微生物修复是指在自然界中获得或人工培养的具有特定功能性质的微生物在一定条件下通过自身的吸附作用、代谢作用,使铀等重金属污染物被吸附固定及氧化还原作用而达到稳定状态或生成难溶性矿化产物,从而降低重金属污染物的化学毒性,是一种新型修复技术^[70]。微生物具有环境适应性好、繁殖再生能力强等特点,是一种经济有效的铀污染治理材料,在实时、实地治理大面积受污染的水体方面具有其独特优势^[71]。目前,微生物修复铀污染地下水可以通过微生物还原、微生物矿化、微生物吸附和微生物富集等不同作用机制(图 2)来实现。

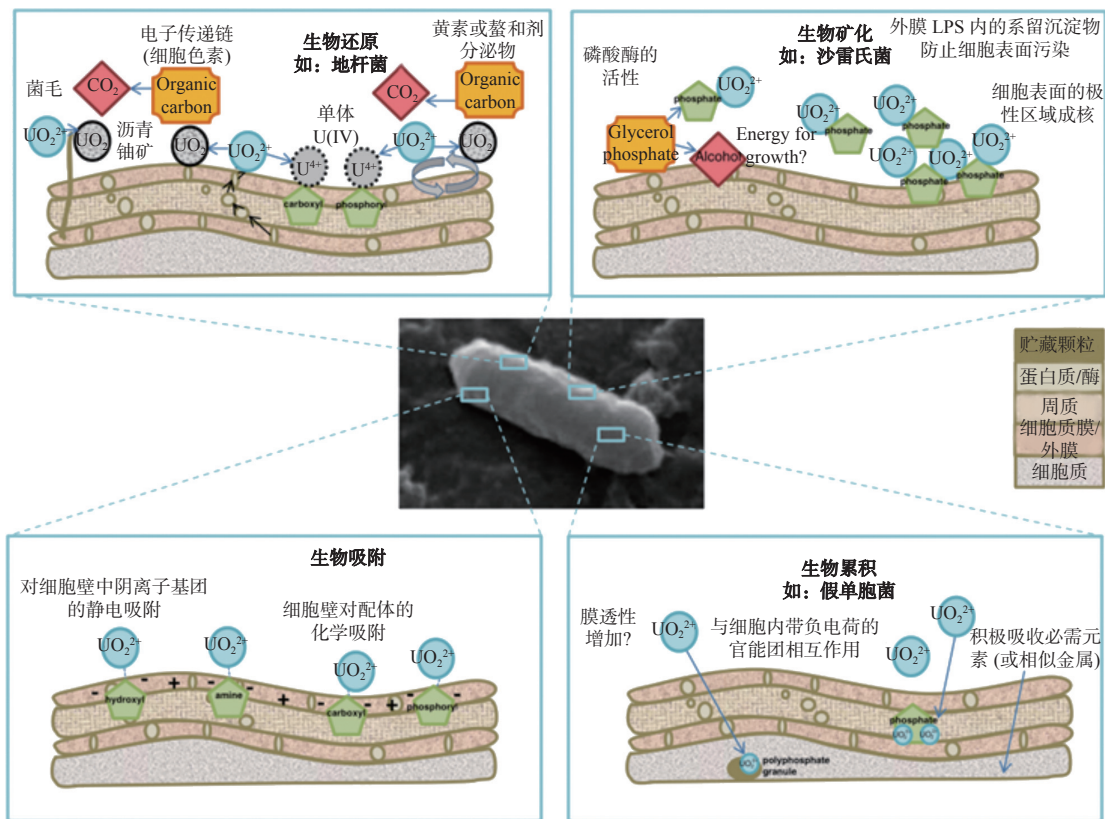


图 2 微生物-铀相互作用机制^[72]

Fig. 2 Schematic diagram of microbial-uranium interaction mechanism^[72]

4.1.1 微生物还原修复技术

微生物还原是指在缺氧条件下能够利用不同的电子受体来获得能量代谢。随着厌氧的进行,最积极有利的电子受体被依次利用,首先是硝酸盐的还原,然后继续进行 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 和硫酸盐还原,最后二氧化碳还原生成甲烷^[72]。该过程通过添加电子供体(如醋酸盐、乳酸盐、乙醇等)激活土著还原菌群,以促进水相的 U(VI) 还原为溶解度较低的沥青铀矿或者非结晶态的 U(IV)。在某些情况下,当环境中的有机物丰富时,硝酸盐和金属还原,或金属和硫酸盐的还原可以同时发生^[73-74]。

1962年 Woolfolk 等^[75]证明了乳酸杆菌还原 U(VI) 的能力,直到 30 年后, Lovely 等^[76]开展了大量的微生物还原(U(VI))的实验,自此微生物还原固铀引起了国内外学者的广泛关注。已有研究^[77]表明,多种微生物如硫酸盐还原菌(如 *Desulfobacterium* spp. 等)、硝酸盐还原菌(*Brevundimonas diminuta* 等)和异化铁还原菌(*Geobacter* spp. 等)等,可以通过其还原作用将溶解性的(U(VI))还原成不溶性的(U(IV)),其还原产物通常为 UO_2 ,但也有研究人员发现以其他形态存在的 U(VI) 的还原产物。例如, *Thermoterrabacterium ferrireducens* 可以还原 U(VI) 为 $[(NH_4)(UO_2)(PO_4) \cdot 3H_2O]$, 而 *Shewanella putrefaciens* CN32 能将固体矿物中的 U(VI) 还原为 $(UO_3 \cdot 2H_2O)$ ^[72]。影响微生物还原技术修复地下水铀污染效果的因素众多,包括微生物群落结构及溶液环境的氧化剂、电子供体、pH 及共存离子等^[78]。微生物还原修复铀污染地下水原理见图 3。

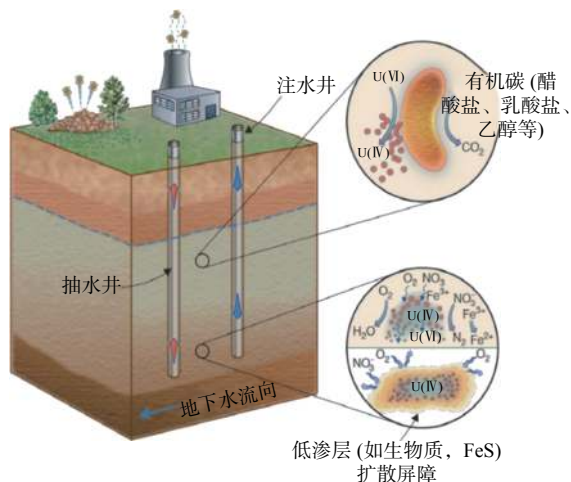


图 3 微生物还原修复铀污染地下水原理图^[72]

Fig. 3 Schematic diagram of in-situ remediation of uranium contaminated groundwater by microbial reduction^[72]

微生物还原修复技术应用于铀污染地下水在国外已有成功的工程实践案例。Anderson 等^[79]在美

国科罗拉多州开展铀修复的试验,通过向污染含水层注入醋酸盐原位激发异化的金属还原菌的生长,研究发现 U(VI) 浓度在 50 天内降至 $0.18 \mu\text{mol/L}$ 以下;吴唯民等^[80]对美国橡树岭综合试验基地进行铀污染原位微生物修复,通过每周 2 天的频率将乙醇注入到反应区地下水后,促进了土著反硝化细菌(NRB)、硫酸盐还原菌(SRB)与 Fe(III) 还原菌的生长,并将 U(VI) 固定为 U(IV),地下水中铀的质量浓度由 $40 \sim 60 \text{ mg/L}$ 下降到 0.03 mg/L 以下;Waston 等^[81]在野外试验场中,将乳化植物油(EVO)注入污染含水层中,试验表明在 3 个月内,排放到地表水中的铀含量降低了 80%,在 1 年的时间内,累积总铀的排放量减少了 50%。国内尚未有工程实践,目前主要处于实验尺度研究和对外国研究成果的综述阶段。

电子供体是否合适,铀还原与其他过程(如硝酸盐和硫酸盐还原等)发生竞争作用时是否具有一定的优势,环境条件是否会对微生物群落的组成及动态变化造成影响,微生物还原形成的矿物相是否长期稳定^[63],外部环境条件改变是否会使固定态的 U(IV) 重新氧化为溶解态的 U(VI) 再次迁移释放到环境中,这些问题都决定了微生物还原技术实地修复是否成功。

4.1.2 微生物矿化修复技术

微生物矿化是通过磷酸盐、碳酸盐或者氢氧化物等与微生物相关的配体,在细胞表面局部碱性条件下,将溶液中的 U(VI) 沉淀的过程^[82]。20 世纪 90 年代初,有学者^[83]利用 *Citrobacter* sp. (后被重新分类为 *Serratia* sp.) 证实了 U(IV) 的微生物矿化作用的存在。当添加甘油磷酸作为电子供体时,微生物的细胞磷酸酶能分解甘油磷酸释放出游离的无机磷酸盐,这些磷酸盐和 U(IV) 在细胞外形成 HUO_2PO_4 矿物沉淀^[84]。另外,在含铀土壤中观察到完全被磷酸铀矿物覆盖的微生物细胞,这表明铀的微生物矿化作用在自然条件下会发生^[85]。

Salome 等^[86]通过外加电子供体与磷酸矿物,在厌氧环境下对混合菌修复铀污染沉积物的方式进行了研究,结果发现在 pH 为 5.0 弱酸及 pH 为 7.0 中性环境下,铀酰离子均大部分与磷酸盐 1:1 结合生成磷酸铀酰类物质 $[UO_2HPO_4, Ca(UO_2)_2(PO_4)_2, H_2(UO_2)_2(PO_4)_2]$,表明在该体系中微生物矿化生成稳定的磷酸铀酰沉淀为其主要的固铀方式。Liang 等^[87]在铀和有机磷源改良的液体培养基中加入硝酸铀

酰和有机磷酸盐,发现在 *Aspergillus niger* 和 *Paecilomyces javanicus* 表面可以观察到铀的磷酸盐沉淀。

将无机磷酸盐直接添加到受铀污染的地下水也可以沉淀 U(VI),但是由于磷酸盐非常活泼,可能会与金属离子迅速生成沉淀,导致注入位置堵塞,阻碍磷酸盐向环境的扩散^[88]。微生物矿化作用与其他机制相比,可以在更宽的 pH 范围内发生,同时生成的磷酸铀酰矿物能长时间保持稳定^[89]。存在的问题主要是细胞表面周围金属的快速沉淀可能会对细胞代谢产生障碍,影响修复的效果,并且微生物矿化修复成本过高^[72]。

4.1.3 微生物吸附与累积修复技术

微生物吸附指的是铀被吸附到活的或者死的微生物细胞表面。由于金属离子结合到微生物细胞壁比吸收进细胞的速度更快,微生物吸附更适合处理中低含量的金属离子废水。目前芽孢杆菌、地杆菌、梭状芽孢杆菌、链霉菌和节杆菌等已证明可以作为铀的生物吸附剂^[90],其中芽孢杆菌已多次用于铀污染的吸附。Li 等^[91]研究了芽孢杆菌对铀的生物吸附作用,结果表明 12 h 可以达到吸附平衡,并且铀的吸附容量大于 6.30 mg/g(湿重)。Zhao 等^[92]研究不同反应条件对芽孢杆菌吸附铀的影响,结果

表明在最佳的反应条件下,铀离子的最大吸附率达 86.86%。

虽然微生物吸附铀具有一定的潜力,但很难将这项技术用于实际的工程治理。存在的问题主要是微生物细胞表面吸附会快速饱和影响吸附容量,另外,若微生物细胞凋亡或分解,吸附的 U(VI)又会被重新释放到溶液中,从而降低了生物吸附 U(VI)的效果。

微生物累积作用是指铀的毒理作用使细胞通透性增大,使溶液中的铀进入到细胞内^[93]。已有的研究^[94-96]发现的细胞内的铀都是以磷酸铀酰的形式存在的,而且大部分的微生物都是假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.),只有个别研究^[97]是节杆菌属 (*Arthrobacter ilicis*)。尽管铀在生物体内积累是一种修复铀的方法,但由于积累量少、积累效率不高,并不是一种理想的修复铀的方法。

目前,已有相关实验分离到固铀能力高达 309.72 mg/g 的斯氏假单胞菌,首次报道了生物吸附、生物矿化和生物还原 3 种机制对微生物富集铀的协同作用^[98],提供了对微生物富集机制的新认识,激励开发从水环境中固定铀的新技术。最后对 4 种微生物与铀相互作用机制进行对比,见表 4。

表 4 铀污染微生物修复作用机制对比

Tab. 4 Comparison of remediation mechanisms of uranium contaminated microorganisms

类型	机制	优点	缺点	研究现状
微生物还原	通过添加电子供体来促进 U(VI) 的酶促还原反应	低成本、高效	需要接近中性的 pH 值,反应产物容易被氧化	常用修复技术,已实现半工业化的应用
微生物矿化	铀与微生物产生的配体或碳酸盐或氢氧化物在细胞表面沉淀	可以在较宽的 pH 值范围内发生,并能长期保持稳定	高成本	主要处于实验室研究阶段
微生物累积	将铀吸收到细胞体内富集	铀浓度可以在一定程度上降低	生物量减少	学术研究层面,基本无证据证实修复是否可行
微生物吸附	铀被动的吸附在细胞表面	吸附迅速,且与细胞的生命代谢无关	吸附容量低,吸附的铀很容易重新释放到环境中	几乎没有工业应用

4.2 植物修复技术

植物修复最早是由 Chaney 等^[99]提出,它是通过筛选和培育特种植物,特别是对土壤及水体目标污染物具有超常规吸收和富集能力的植物,种植在污染土壤及水体上,利用修复植物及其根际生物圈,吸收、降解、挥发、根滤和转化作用,达到去除土壤、水体中的污染物,或使污染物固定以减轻其危害性,或使污染物转化为毒性较低化学形态的现场治理技术^[100]。针对大面积低含量铀污染的修复,植物修复技术与其他修复技术相比具有经济可行、技术有效、无二次污染和对环境扰动较小等优点,得到

了较为广泛的应用^[101]。植物修复的主要机理包括植物提取(Phytoextraction)、植物稳定(Phytostabilization)、植物挥发(Phytovolatilization)和植物降解(Phytodegradation)等,根据所提取的金属和所用植物的不同,可采用不同的修复机制,见图 4。

Shahandeh 等^[103]研究了 34 种植物富集铀的能力,其中印度芥菜和向日葵具有更好的铀富集能力,地上部分铀质量分数分别为 24.6 mg/kg 和 21.8 mg/kg。徐俊等^[104]采用营养液结合土壤培养的方法,在 100.0 mg/kg 的铀条件下,与小白菜和冬苋菜相比,菠菜对土壤中的铀具有更高的吸收和积累能力,其

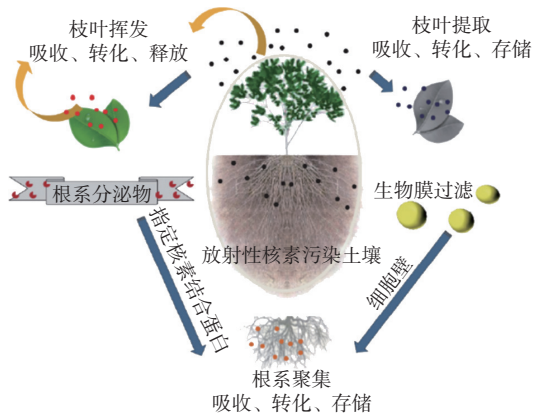


图4 植物修复过程^[102]

Fig. 4 Phytoremediation processes^[102]

地上部分铀含量为 232 mg/kg, 地下部分达到 433 mg/kg。Pratas 等^[105]进行了室内试验研究本地植物水马齿、西藏眼子菜和篦齿眼子菜从受污染的水中积累铀(VI)的能力, 结果表明, 在 U(VI)初始质量浓度为 500 μg/L 时, 对 U(VI)的去除效率为 85.5%, 然

而, U(VI)浓度超过 1 000 μg/L 会导致植物腐烂和分解。Alsabbagh 等^[106]用向日葵对约旦铀矿地区铀污染土壤进行植物修复, 结果表明, 随着土壤中铀的初始含量的增加, 植物的铀转移量也在增加。然而, 向日葵吸收的大部分铀积累在根部。此外, 向日葵植物的生物量没有受到植物中铀含量增加的影响, 虽然铀的去除率在不同浓度的土壤中显示出相似的数值, 但向日葵植物中的总铀含量随着土壤中铀含量的增加而增加。

利用植物修复铀污染土壤与水体已有一些实际应用(表 5), 并取得了一定的效果。影响植物修复效率的因素很多, 例如, 土壤性质如 pH、土壤含水量、土壤理化性质、有机质含量等会影响植物生长条件和铀的生物有效性^[113]。因此, 植物修复常仅限于污染物接近植物表面或深入植物根部的情况, 如何安全控制并处理大量受影响的植物也是有待解决的问题。

表 5 植物修复铀污染案例

Tab. 5 Phytoremediation of uranium contamination

地区	修复植物	初始铀含量	时间/d	植物吸收铀含量	文献
约旦	向日葵	156 μg/g	70	318 μg/g	[106]
斯洛文尼亚	博落回	9 000 mg/kg	120	2.19 μg/g	[107]
美国弗吉尼亚州	尼古丁	15.3 mg/kg	7	4.18 mg/kg	[108]
中国山东	长喙田菁, 丛枝菌根, 根瘤菌	300 mg/kg	60	73.2 mg/kg	[109]
瑞士	白色羽扇豆	413 mg/kg	5	40 mg/kg	[110]
捷克	烟草	0.5 mmol/L	16	16 000 μg/g	[111]
中国华南地区	碎米莎草	0.05 g/kg	3	36.4 mg/kg	[112]

5 铀矿区地下水污染治理与修复技术发展方向

随着“碳中和, 碳达峰”等目标的推进, 核电必将发挥更加重要的作用, 铀资源的开发和利用需求不断增加, 加强铀矿区地下水污染治理与修复技术研究, 保障环境安全具有重要意义。当前, 常用的铀矿区地下水污染治理与修复技术研究中仍有一些问题没有解决, 如对现有技术的改进、修复效果的强化途径、对特定污染区的适用性等, 需要进一步探索。

目前, 国内在铀矿区地下水污染治理与修复技术研究中大多处于实验室阶段, 虽开展了部分场地的污染修复工作, 也以场地实验为主, 与用于实际工程有一定的差距, 因此, 如何针对不同野外条件

对修复性能进行优化是未来研究的重点。利用不同修复技术的特点, 结合不同的铀矿区的水文地质条件和污染特征, 把多种技术组合, 用于铀矿区地下水污染治理与修复将是未来的技术发展方向^[114]。发挥仿真软件和智能算法的优势, 对铀矿区地下水进行模拟和优化来确定最佳技术工艺参数, 在铀矿区地下水污染治理与修复中必将发挥更大的作用。开发绿色、低碳、高效、经济的修复材料, 确保对地下水铀污染修复具有长期有效性, 也是亟待解决的重要问题。此外, 铀矿区土壤和地下水联合修复, 也是今后需要解决的难点问题。

6 结论

随着核能燃料需求的不断增加, 铀资源的开发和利用日益推进, 铀矿区地下水环境问题愈加凸显,

铀矿区地下水安全面临巨大挑战,总结铀矿区地下水污染的治理与修复技术,对铀矿区环境保护与管理具有重要意义。

铀矿区地下水污染的物理化学修复技术应用还十分有限,其处理产物费用昂贵,另外受区域地下水流场影响较大,处理不当会对地下水造成二次污染。生物修复技术在实时、实地治理大面积受污染的水体方面具有其独特优势,是解决铀污染治理和可持续发展的有效途径。PRB 技术虽然较早广泛应用于修复治理地下水污染问题并取得了一定的修复效果,但是仍存在一些问题影响 PRB 运行的长效性,如介质材料的选择、反应介质材料堵塞和地下水水质复杂等。

对于铀矿区地下水污染的治理与修复要考虑场地实地情况,目前还没有一种技术完全适合在所有条件下去除铀,未来的重点是要开发先进的联合修复技术。此外,对于多组分复杂的水-岩相互作用体系,铀在其中的吸附-解吸、氧化-还原等行为与机理的研究与地下水污染修复技术的发展息息相关,还需要深入的研究。

当前铀矿区地下水污染的原位治理与修复技术以实验室研究为主,缺乏对实际铀矿区地下水污染治理与修复的工程实践,如何结合实际铀矿区水文地质条件和污染特征开发绿色、高效、低碳的治理与修复技术,是未来铀矿区地下水污染治理修复的重要发展方向。

参考文献(References):

- [1] 曾华.新型铁基-HAP复合材料的可控制备及其对地下水铀污染的吸附性能[D].南昌:南昌大学,2019.(ZENG H.Controllable preparation of a novel Fe-HAP composite and its adsorption performance for uranium contamination in groundwater[D].Nanchang:Nanchang University,2019.(in Chinese))
- [2] GU P, ZHANG S, LI X, et al. Recent advances in layered double hydroxide-based nanomaterials for the removal of radionuclides from aqueous solution[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 493-505. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.04.136.
- [3] CHEN Y, MARTIN G, CHABERT C, et al. Prospects in China for nuclear development up to 2050[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2018, 103: 81-90. DOI: 10.1016/j.pnucene.2017.11.011.
- [4] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION.China's nuclear fuel cycle[EB/OL]. (2019-10-29)[2022-03-12]. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-fuel-cycle.aspx>.
- [5] 孙占学,刘媛媛,马文洁,等.铀矿区地下水及其生态安全研究进展[J].*地学前缘*,2014,21(4):158-167.(SUN Z X, LIU Y Y, MA W J, et al. Groundwater and its ecological security in uranium mining areas:a review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4):158-167.(in Chinese)) DOI:10.13745/j.esf.2014.04.017.
- [6] WHO.Guidelines for drinking-water quality, fourth edition[S]. Geneva, World Health Organization, 2011.
- [7] NHMRC.Australian drinking water guidelines paper 6. national water quality management strategy[EB/OL]. (2011-10)[2022-03-12]. <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/australian-drinking-water-guidelines>.
- [8] SAHOO S K, JHA V N, PATRA A C, et al. Scientific background and methodology adopted on derivation of regulatory limit for uranium in drinking water-A global perspective[J]. *Environmental Advances*, 2020, 2: 100020. DOI: 10.1016/j.envadv.2020.100020.
- [9] HEALTH CANADA.Guidelines for Canadian drinking water quality: Summary table[S]. Water, Air and Climate Change Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, Ottawa, Ontario, 2012.
- [10] BANNING A, BENFER M. Drinking water uranium and potential health effects in the German federal state of Bavaria[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(8): 927. DOI: 10.3390/ijerph14080927.
- [11] MHLW.Ministry of health, labour and welfare[EB/OL]. (2009-03)[2022-03-12]. https://www.mhlw.go.jp/english/policy/health/water_supply/menu.html.
- [12] AERB.Atomic energy regulatory board Mumbai,India.in: radiological safety in uranium mining and milling[EB/OL]. (2004-05-29)[2022-03-12]. [http://refhub.elsevier.com/S2772-8838\(22\)00022-X/sbref0004](http://refhub.elsevier.com/S2772-8838(22)00022-X/sbref0004).
- [13] MINISTRY OF HEALTH.Drinking-water standards for New Zealand 2005 (Revised 2008) [M]. Wellington:Ministry of Health, 2008:175.
- [14] NGU.Uranium in drinking water[EB/OL]. (2005-06) [2022-03-12]. https://www.ngu.no/filearchive/167/NGU_FOKUS_nr6_2005.pdf.
- [15] BALARAM V, RANI A, RATHORE D P S. Uranium in groundwater in parts of India and world:A comprehensive review of sources, impact to the en-

- vironment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies[J]. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, 1(2): 100043. DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100043.
- [16] US EPA. 2018 edition of the drinking water standards and health advisories[S]. Washington DC: Office of Water. U.S. Environmental Protection Agency, Spring 2018, EPA, 822-F-18-001.
- [17] 李佳霖. 重金属污染地下水的硫基混养生物可渗透反应墙原位修复技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. (LI J L. Study on in situ remediation technology of sulfur-based hybrid permeable reaction wall for groundwater contaminated by heavy metals[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese))
- [18] 王煦栋, 刘思金, 徐明. 地下水铀污染与饮用水中铀的健康风险[J]. *环境化学*, 2021, 40(6): 1631-1642. (WANG X D, LIU S J, XU M. Uranium contamination in groundwater and health risks of uranium in drinking water[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(6): 1631-1642. (in Chinese)) DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2021021804.
- [19] XIE Y, CHEN C, REN X, et al. Emerging natural and tailored materials for uranium-contaminated water treatment and environmental remediation[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 103: 180-234. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.01.005.
- [20] WU Y, WANG Y, XIE X. Occurrence, behavior and distribution of high levels of uranium in shallow groundwater at Datong basin, northern China[J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 472: 809-817. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.109.
- [21] GUO H, JIA Y, WANTY R B, et al. Contrasting distributions of groundwater arsenic and uranium in the western Hetao basin, Inner Mongolia: Implication for origins and fate controls[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 541: 1172-1190. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.018.
- [22] NOLAN J, WEBER K A. Natural uranium contamination in major U.S. aquifers linked to nitrate[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2015, 2(8): 215-220. DOI: 10.1021/acs.estlett.5b00174.
- [23] POST V E A, VASSOLO S I, TIBERGHEN C, et al. High uranium concentrations in groundwater in burundi[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, 17: 524-527. DOI: 10.1016/j.proeps.2016.12.132.
- [24] COYTE R M, JAIN R C, SRIVASTAVA S K, et al. Large-scale uranium contamination of groundwater resources in India[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, 5(6): 341-347. DOI: 10.1021/acs.estlett.8b00215.
- [25] BANNING A, PAWLETKO N, R?DER J, et al. Ex situ groundwater treatment triggering the mobilization of geogenic uranium from aquifer sediments[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 587-588: 371-380. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.162.
- [26] 齐文, 高柏, 陈井影, 等. 某铀尾矿库周边环境铀的分布特征及评价[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2016(5): 53-56. (QI W, GAO B, CHEN J Y, et al. Distribution characteristics and evaluation of uranium in the water environment around a uranium tailings pond[J]. *Nonferrous Metals (Smelting)*, 2016(5): 53-56. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2016.05.015.
- [27] 赵威光, 郭华明, 张莉, 等. 河套平原沉积物中铀的赋存形态及其与地下水铀浓度的关系[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(2): 24-30. (ZHAO W G, GUO H M, ZHANG L, et al. Uranium speciation in sediments of Hetao plain and its relationship with uranium concentration in groundwater[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2015, 42(2): 24-30. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.02.04.
- [28] WU Y, LI J, WANG Y, et al. Variations of uranium concentrations in a multi-aquifer system under the impact of surface water-groundwater interaction[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 211: 65-76. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2018.03.007.
- [29] SHI S, TANG X, YANG Y, et al. Biological effects of uranium in water, soil and rice in uranium deposits in southern China[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, 328(2): 507-517. DOI: 10.1007/s10967-021-07689-w.
- [30] CHEN G, SUN Z, NIE F, et al. Hydrogeochemical characteristics of the sandstone-hosted uranium mineralization in northern Ordos basin, China[J]. *Ore Geology Review*, 2020, 126: 103769. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103769.
- [31] DONG Y, XIE Y, LI G, et al. Efficient natural attenuation of acidic contaminants in a confined aquifer[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7): 595. DOI: 10.1007/s12665-016-5389-8.
- [32] YUE S, WANG G. Relationship between the hydrogeochemical environment and sandstone-type uranium mineralization in the Ili basin, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(1): 133-139. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2010.11.010.
- [33] BALA R, KARANVEER, DAS D. Occurrence and behaviour of uranium in the groundwater and potential health risk associated in semi-arid region of

- Punjab, India[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2022, 17: 100731. DOI: 10.1016/j.gsd.2022.100731.
- [34] SAUNDERS J A, PIVETZ B E, VOORHIES N, et al. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 67-83. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.08.049.
- [35] ATKINS M L, SANTOS I R, PERKINS A, et al. Dissolved radon and uranium in groundwater in a potential coal seam gas development region (Richmond River Catchment, Australia)[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 154: 83-92. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.01.014.
- [36] BOGUSLAVSKY A E, GASKOVA O L, NAYMUSHINA O S, et al. Environmental monitoring of low-level radioactive waste disposal in electrochemical plant facilities in Zelenogorsk, Russia[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 119: 104598. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104598.
- [37] DESBARATS A J, PERCIVAL J B, VENANCE K E. Trace element mobility in mine waters from granitic pegmatite U-Th-REE deposits, Bancroft area, Ontario[J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 67: 153-167. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.02.010.
- [38] BAIK M H, JUNG E C, JEONG J. Determination of uranium concentration and speciation in natural granitic groundwater using TRLFS[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, 305(2): 589-598. DOI: 10.1007/s10967-015-3971-2.
- [39] XIONG L, ALSHAMSI D, YI P, et al. Distribution of uranium isotopes in groundwater of the UAE: Environmental radioactivity assessment[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2020, 325(1): 57-66. DOI: 10.1007/s10967-020-07216-3.
- [40] KAWABATA V, APARIN V, NAGAI M, et al. Uranium and thorium isotopes from Kazakhstan[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2008, 278(2): 459-462. DOI: 10.1007/s10967-008-0904-3.
- [41] NRIAGU J, NAM D, AYANWOLA T A, et al. High levels of uranium in groundwater of Ulaanbaatar, Mongolia[J]. *Science of The Total Environment*, 2012, 414: 722-726. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.037.
- [42] MAKUBALO S S, DIAMOND R E. Hydrochemical evolution of high uranium, fluoride and nitrate groundwaters of Namakwaland, South Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, 172: 104002. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2020.104002.
- [43] MATHUTHU M, UUSHONA V, INDONGO V. Radiological safety of groundwater around a uranium mine in Namibia[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2021, 122: 102915. DOI: 10.1016/j.pce.2020.102915.
- [44] WANG J, LIU J, LI H, et al. Uranium and thorium leachability in contaminated stream sediments from a uranium minesite[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 176: 85-90. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.01.008.
- [45] 张春艳, 占凌之, 华恩祥, 等. 某铀尾矿库周边地下水的水化学特征分析[J]. *环境化学*, 2015, 34(11): 2103-2108. (ZHANG C Y, ZHAN L Z, HUA E X, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater around a uranium tailing pond[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(11): 2103-2108. (in Chinese)) DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.11.2015070901.
- [46] 施宸皓, 梁婕, 曾光明, 等. 某废弃铀矿周边农田土壤重金属和放射性元素的风险分析和修复措施[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(1): 213-219. (SHI C H, LIANG J, ZENG G M, et al. Risk analysis and remediation measures of heavy metals and radioactive elements in farmland soil around an abandoned uranium mine[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(1): 213-219. (in Chinese)) DOI: 10.12030/j.cjee.201701006.
- [47] CHEN J, CHEN P, YAO D X, et al. Geochemistry of uranium in Chinese coals and the emission inventory of coal-fired power plants in China[J]. *International Geology Review*, 2018, 60(5/6): 621-637. DOI: 10.4324/9780429449369-6.
- [48] 王新宇, 倪师军, 施泽明. 磷矿影响区: 绵远河铀含量分析与形态计算[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(S1): 426. (WANG X Y, NI S J, SHI Z M. Phosphate rock affected area: Uranium content analysis and speciation calculation in Mianyuan River[J]. *Progress in Earth Science*, 2012, 27(S1): 426. (in Chinese))
- [49] SCHNUG E, LOTTERMOSER B G. Fertilizer-derived uranium and its threat to human health[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(6): 2433-2434. DOI: 10.1021/es4002357.
- [50] DAVIS J A, CURTIS G P. Consideration of geochemical issues in groundwater restoration at uranium in-situ leach mining facilities (No. NUREG/CR-6870)[EB/OL]. (2007-01)[2022-03-12]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6870/index.html>.
- [51] CATCHPOLE G, KUCHELKA R. Groundwater restoration of uranium ISL mines in the United

- States[C]//US Department of Energy.Proceedings of workshop on uranium production environmental restoration: An exchange between the United States and Germany.Pasadena: Jacobs Engineering Group, 1993.
- [52] MEHTA V S, MAILLOT F, WANG Z, et al. Transport of U(VI) through sediments amended with phosphate to induce in situ uranium immobilization[J]. *Water Research*, 2015, 69: 307-317. DOI: [10.1016/j.watres.2014.11.044](https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.044).
- [53] PAN Z, GIAMMAR D E, MEHTA V, et al. Phosphate-induced immobilization of uranium in Hanford sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(24): 13486-13494. DOI: [10.1021/acs.est.6b02928](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02928).
- [54] RUIZ O, THOMSON B, CERRATO J M, et al. Groundwater restoration following in-situ recovery (ISR) mining of uranium[J]. *Applied Geochemistry*, 2019, 109: 104418. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2019.104418](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104418).
- [55] KIM G, SHON D, PARK H, et al. Development of pilot-scale electrokinetic remediation technology for uranium removal[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 80(1): 67-72. DOI: [10.1016/j.seppur.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.009).
- [56] XIAO J, PANG Z, ZHOU S, et al. The mechanism of acid-washed zero-valent iron/activated carbon as permeable reactive barrier enhanced electrokinetic remediation of uranium-contaminated soil[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 244: 116667. DOI: [10.1016/j.seppur.2020.116667](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116667).
- [57] 黄国夫. 酸法地浸采铀的地下水生态环境问题[J]. 华东地质学院学报, 1998(1): 8-9. (HUANG G F. Ecological environment of groundwater for uranium mining by acid leaching[J]. *Journal of East China Institute of Geology*, 1998(1): 8-9. (in Chinese))
- [58] 孙占学, 马文洁, 刘亚洁, 等. 地浸采铀矿山地下水环境修复研究进展[J]. *地学前缘*, 2021, 28(5): 215-225. (SUN Z X, MA W J, LIU Y J, et al. Research progress on groundwater environment restoration of in-situ leaching uranium mine in mountainous area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(5): 215-225. (in Chinese)) DOI: [10.13745/j.esf.sf.2021.2.11](https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.2.11).
- [59] 李艳梅, 高柏, 马文洁, 等. 可渗透反应墙技术修复铀矿区地下水中铀锰进展[J]. *水处理技术*, 2020, 46(10): 12-16. (LI Y M, GAO B, MA W J, et al. Progress of uranium-manganese remediation in groundwater from uranium mining areas by permeable reaction wall technology[J]. *Water Treatment Technology*, 2020, 46(10): 12-16. (in Chinese)) DOI: [10.16796/j.cnki.1000-3770.2020.10.003](https://doi.org/10.16796/j.cnki.1000-3770.2020.10.003).
- [60] ROEHL K E, CZURDA K, MEGGYES T, et al. Long-term performance of permeable reactive barriers[M]. New York:Elsevier, 2005:1-25.
- [61] NAFTZ D L, MORRISON S J, DAVIS J A, et al. Hand-book of groundwater remediation using permeable reactive barriers:Applications to radionuclides, trace metals, and nutrients[M]. Amsterdam: Academic Press, 2002:435-463.
- [62] LIU N, DING F, WANG L, et al. Coupling of bio-PRB and enclosed in-well aeration system for remediation of nitrobenzene and aniline in groundwater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(10): 9972-9983. DOI: [10.1007/s11356-016-6206-3](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6206-3).
- [63] SIMON F G, BIERMANN V. Groundwater remediation using permeable reactive barriers[M]// MEGGYES T.Sustainable environmental protection. Berlin: Bundesanstalt Für, 2007: 14-19.
- [64] GROUDEV S, GEPRGIEV P, SPASOVA I, et al. Cleanup of acid mine drainage by means of a pilot-scale passive system[J]. *Annual of the University of Mining and Geology*, 2005, 48: 217-220.
- [65] 徐乐昌, 周星火, 詹旺生, 等. 某铀矿尾矿堆场受污染地下水的渗透反应墙修复初探[J]. *铀矿冶*, 2006(3): 153-157. (XU L C, ZHOU X H, ZHAN W S, et al. A preliminary investigation on the remediation of contaminated groundwater in a uranium mine tailings dumpsite by infiltration reaction wall[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2006(3): 153-157. (in Chinese)) DOI: [10.13426/j.cnki.yky.2006.03.009](https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2006.03.009).
- [66] 张威, 韩占涛, 许广明. 纳米零价铁用于地下水污染修复时存在的问题与对策[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(4): 34-38. (ZHANG W, HAN Z T, XU G M, et al. Problems and countermeasures of nano zero valent iron used in groundwater remediation[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, 10(4): 34-38. (in Chinese)) DOI: [10.3724/sp.J.1201.2012.04034](https://doi.org/10.3724/sp.J.1201.2012.04034).
- [67] HORNIG G, NORTHCOTT K, STEVENS G, et al. Assessment of sorbent materials for treatment of hydrocarbon contaminated ground water in cold regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(1): 83-91. DOI: [10.1016/j.coldregions.2007.08.004](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.004).
- [68] 高芳.PRB处理地下水中铀污染物的介质材料筛选及其效果研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2015. (GAO F. Screening of media materials for the treatment of uranium contaminants in groundwater by

- PRB and its effectiveness[D]. Nanchang: Donghua University of Technology, 2015.(in Chinese)
- [69] 刘宸, 李小燕, 刘晴晴, 等. 沸石-纳米零价铁复合材料对铀的吸附性能研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(1): 28-33. (LIU C, LI X Y, LIU Q Q, et al. Study on the adsorption performance of zeolite-nano zero-valent iron composites on uranium[J]. *Journal of South China University (Natural Science Edition)*, 2018, 32(1): 28-33. (in Chinese)) DOI: [10.19431/j.cnki.1673-0062.2018.01.005](https://doi.org/10.19431/j.cnki.1673-0062.2018.01.005).
- [70] 杜良, 李焯, 王萍, 等. 铀污染土壤生物修复研究进展[J]. *环境工程*, 2013, 31(S1): 543-546. (DU L, LI Y, WANG P, et al. Research progress of bioremediation of contaminated soil by uranium[J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(S1): 543-546. (in Chinese)) DOI: [10.13205/j.hjgc.2013.s1.123](https://doi.org/10.13205/j.hjgc.2013.s1.123).
- [71] 张健, 宋晗, 邓洪, 等. 铀与微生物相互作用研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(1): 55-62. (ZHANG J, SONG H, DENG H, et al. Research progress in the interaction between uranium and microorganisms[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(1): 55-62. (in Chinese)) DOI: [10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.016](https://doi.org/10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.016).
- [72] NEWSOME L, MORRIS K, LLOYD J R. The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides[J]. *Chemical Geology*, 2014, 363: 164-184. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2013.10.034](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.034).
- [73] MADDEN A S, SMITH A C, BALKWILL D L, et al. Microbial uranium immobilization independent of nitrate reduction[J]. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(9): 2321-2330. DOI: [10.1111/j.1462-2920.2007.01347.x](https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01347.x).
- [74] WILLIAMS K H, LONG P E, DAVIS J A, et al. Acetate availability and its influence on sustainable bioremediation of uranium contaminated groundwater[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2011, 28(5/6): 519-539. DOI: [10.1080/01490451.2010.520074](https://doi.org/10.1080/01490451.2010.520074).
- [75] WOOLFOLK C A, WHITELEY H R. Reduction of inorganic compounds with molecular hydrogen by micrococcus lactilycus I: Stoichiometry with compounds of arsenic, selenium, tellurium, transition and other elements[J]. *Journal of Bacteriology*, 1962, 84(4): 647-658. DOI: [10.1128/JB.84.4.647-658.1962](https://doi.org/10.1128/JB.84.4.647-658.1962).
- [76] LOVLEY D R, PHILLIPS E J P, GORBY Y A, et al. Microbial reduction of uranium[J]. *Nature*, 1991, 6317(350): 413-416. DOI: [10.1038/350413a0](https://doi.org/10.1038/350413a0).
- [77] AKASH S, SIVAPRAKASH B, RAJA V C V, et al. Remediation techniques for uranium removal from polluted environment: Review on methods, mechanism and toxicology[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 302: 119068. DOI: [10.1016/j.envpol.2022.119068](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119068).
- [78] 王国华, 杨思芹, 周耀辉, 等. 生物还原法修复铀污染地下水的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(8): 47-53. (WANG G H, YANG S Q, ZHOU Y H, et al. Research progress of bioreduction method for remediation of uranium-contaminated groundwater[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(8): 47-53. (in Chinese)) DOI: [10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.08.008](https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.08.008).
- [79] ANDERSON R T, VRIONIS H A, ORTIZ-BERNAD I, et al. Stimulating the in situ activity of geobacter species to remove uranium from the groundwater of a uranium-contaminated aquifer[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69: 5884-5891. DOI: [10.1128/AEM.69.10.5884-5891.2003](https://doi.org/10.1128/AEM.69.10.5884-5891.2003).
- [80] 吴唯民, CARLEY J, WATSON D, et al. 地下水铀污染的原位微生物还原与固定: 在美国能源部田纳西橡树岭放射物污染现场的试验[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 449-459. (WU W M, CARLEY J, WATSON D, et al. In situ microbial reduction and immobilization of uranium contamination in groundwater: Experiments at the U.S. Department of Energy Oak Ridge radioactive contamination site, Tennessee[J]. *Journal of Environmental Science*, 2011, 31(3): 449-459. (in Chinese)) DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2011.03.002](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2011.03.002).
- [81] WATSON D B, WU W, MEHLHORN T, et al. In situ bioremediation of uranium with emulsified vegetable oil as the electron donor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6440-6448. DOI: [10.1021/es3033555](https://doi.org/10.1021/es3033555).
- [82] VAN ROY S, PEYS K, DRESSELAERS T, et al. The use of an alcaligenes eutrophus biofilm in a membrane bioreactor for heavy metal recovery[J]. *Research in Microbiology*, 1997, 148(6): 526-528. DOI: [10.1016/S0923-2508\(97\)88356-8](https://doi.org/10.1016/S0923-2508(97)88356-8).
- [83] PATTANAPIITPAISAL P, MABBETT A N, FINLAY J A, et al. Reduction of Cr(VI) and bioaccumulation of chromium by gram positive and gram negative microorganisms not previously exposed to Cr-Stress[J]. *Environmental Technology*, 2002, 23(7): 731-745. DOI: [10.1080/09593332308618367](https://doi.org/10.1080/09593332308618367).
- [84] MACASKIE L E, EMPSON R M, CHEETHAM A K, et al. Uranium bioaccumulation by a Citrobacter sp. as a result of enzymically mediated growth of polycrystalline HUO_2PO_4 [J]. *Science*, 1992, 257

- (5071): 782-784. DOI: [10.1126/science.1496397](https://doi.org/10.1126/science.1496397).
- [85] MONDANI L, BENZERARA K, CARRIÈRE M, et al. Influence of uranium on bacterial communities: A comparison of natural uranium-rich soils with controls[J]. *PLoS One*, 2011, 6(10): e25771. DOI: [10.1371/journal.pone.0025771](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025771).
- [86] SALOME K R, GREEN S J, BEAZLEY M J, et al. The role of anaerobic respiration in the immobilization of uranium through biomineralization of phosphate minerals[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 106: 344-363. DOI: [10.1016/j.gca.2012.12.037](https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.12.037).
- [87] LIANG X, CSETENYI L, GADD G M. Uranium bioprecipitation mediated by yeasts utilizing organic phosphorus substrates[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(11): 5141-5151. DOI: [10.1007/s00253-016-7327-9](https://doi.org/10.1007/s00253-016-7327-9).
- [88] WELLMAN D M, ICENHOWER J P, OWEN A T. Comparative analysis of soluble phosphate amendments for the remediation of heavy metal contaminants: Effect on sediment hydraulic conductivity[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 3(3): 219-224. DOI: [10.1071/EN05023](https://doi.org/10.1071/EN05023).
- [89] BEAZLEY M J, MARTINEZ R J, WEBB S M, et al. The effect of pH and natural microbial phosphatase activity on the speciation of uranium in subsurface soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(19): 5648-5663. DOI: [10.1016/j.gca.2011.07.006](https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.006).
- [90] 钟娟, 刘兴宇, 张明江, 等. 铀污染的微生物修复技术研究进展[J]. *稀有金属*, 2021, 45(1): 93-105. (ZHONG J, LIU X Y, ZHANG M J, et al. Research progress of microbial remediation technology for uranium contamination[J]. *Rare Metals*, 2021, 45(1): 93-105. (in Chinese)) DOI: [10.13373/j.cnki.cjrm.XY19040039](https://doi.org/10.13373/j.cnki.cjrm.XY19040039).
- [91] LI X, DING C, LIAO J, et al. Biosorption of uranium on *Bacillus sp.dwc-2*: Preliminary investigation on mechanism[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, 135: 6-12. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2014.03.017](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.03.017).
- [92] ZHAO C, LIU J, LI X, et al. Biosorption and bioaccumulation behavior of uranium on *Bacillus sp.dwc-2*: Investigation by Box-Behenken design method[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 221: 156-165. DOI: [10.1016/j.molliq.2016.05.085](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.05.085).
- [93] SUZUKI Y, BANFIELD J F. Geomicrobiology of uranium[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1999, 38(4): 393-424.
- [94] VANENGELEN M R, FIELD E K, GERLACH R, et al. UO_2^{2+} speciation determines uranium toxicity and bioaccumulation in an environmental *Pseudomonas* isolate[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, 29(4): 763-769. DOI: [10.1002/etc.126](https://doi.org/10.1002/etc.126).
- [95] CHOUDHARY S, SAR P. Uranium biomineralization by a metal resistant *Pseudomonas aeruginosa* strain isolated from contaminated mine waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 336-343. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2010.11.004](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.004).
- [96] KAZY S K, D'SOUZA S F, SAR P. Uranium and thorium sequestration by a *Pseudomonas* sp.: Mechanism and chemical characterization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(1): 65-72. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2008.06.076](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.076).
- [97] SUZUKI Y, BANFIELD J F. Resistance to, and accumulation of, uranium by bacteria from a uranium-contaminated site[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2004, 21(2): 113-121. DOI: [10.1080/01490450490266361](https://doi.org/10.1080/01490450490266361).
- [98] YU Q, YUAN Y, FENG L, et al. Highly efficient immobilization of environmental uranium contamination with *Pseudomonas stutzeri* by biosorption, biomineralization, and bioreduction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127758. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2021.127758](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127758).
- [99] CHANEY R L, MALIK M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3): 279-284. DOI: [10.1016/S0958-1669\(97\)80004-3](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80004-3).
- [100] 荣丽杉. 铀污染土壤的植物-微生物修复及其机理研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015. (RONG L S. Phytomicrobial remediation of uranium-contaminated soil and its mechanism[D]. Hengyang: South China University, 2015. (in Chinese))
- [101] 唐垂云, 钟娟, 吕莹, 等. 土壤中铀污染修复技术研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(8): 4587-4599. (TANG C Y, ZHONG J, LYU Y, et al. Research progress on remediation technology of uranium contamination in soil[J]. *Chemical Progress*, 2021, 40(8): 4587-4599. (in Chinese)) DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2020.1923](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020.1923).
- [102] 高柏, 高杨, 蒋文波, 等. 铀矿区放射性污染土壤修复技术研究进展[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(8): 28-36. (GAO B, GAO Y, JIANG W B, et al. Research progress on remediation technology of radioactive contaminated soil in uranium mining areas[J]. *Nonferrous Metals (Smelting Part)*, 2021(8): 28-36. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1007-7545.2021.08.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7545.2021.08.004).
- [103] SHAHANDER H, HOSSNER L R. Role of soil properties in phytoaccumulation of uranium[J].

- Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 141(1): 165-180. DOI: [10.1023/A:1021346828490](https://doi.org/10.1023/A:1021346828490).
- [104] 徐俊, 龚永兵, 张倩慈, 等. 三种植物对铀耐性及土壤中铀吸收积累差异的研究[J]. *化学研究与应用*, 2009, 21(3): 322-326. (XU J, GONG Y B, ZHANG Q C, et al. Study on the differences in uranium tolerance and uranium uptake and accumulation in soils of three plant species[J]. *Chemical Research and Applications*, 2009, 21(3): 322-326. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1004-1656.2009.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1656.2009.03.008).
- [105] PRATAS J, PAULO C, FAVAS P J C, et al. Potential of aquatic plants for phytofiltration of uranium-contaminated waters in laboratory conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 170-176. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2014.03.046](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.046).
- [106] ALSABBAGH A H, ABUQUDAIRA T M. Phytoremediation of jordanian uranium-rich soil using sunflower[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2017, 228(6): 219. DOI: [10.1007/s11270-017-3396-3](https://doi.org/10.1007/s11270-017-3396-3).
- [107] ATROK M, SMODIS B. Soil-to-plant transfer factors for natural radionuclides in grass in the vicinity of a former uranium mine[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 261: 279-284. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2013.03.036](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.03.036).
- [108] STOJANOVIC M D, MIHAJLOVIC M L, MILOJKOVIC J V, et al. Efficient phytoremediation of uranium mine tailings by tobacco[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2012, 10(4): 377-381. DOI: [10.1007/s10311-012-0362-6](https://doi.org/10.1007/s10311-012-0362-6).
- [109] REN C, KONG C, WANG S, et al. Enhanced phytoremediation of uranium-contaminated soils by arbuscular mycorrhiza and rhizobium[J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 773-779. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2018.11.085](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.085).
- [110] HENNER P, BR?DOIRE F, TAILLIEZ A, et al. Influence of root exudation of white lupine (*Lupinus albus* L.) on uranium phytoavailability in a naturally uranium-rich soil[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, 190/191: 39-50. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2018.04.022](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.04.022).
- [111] SOUDEK P, PETROVA S, BUZEK M, et al. Uranium uptake in *Nicotiana* sp. under hydroponic conditions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 142: 130-137. DOI: [10.1016/j.gexplo.2013.10.001](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.10.001).
- [112] LI G, HU N, DING D, et al. Screening of plant species for phytoremediation of uranium, thorium, barium, nickel, strontium and lead contaminated soils from a uranium mill tailings repository in south China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, 86(6): 646-652. DOI: [10.1007/s00128-011-0291-2](https://doi.org/10.1007/s00128-011-0291-2).
- [113] 孟祥鹏. 基于植物修复铀矿冶尾矿库退役后流出的铀离子污染的实验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015. (MENG X P. Experimental study on phytoremediation of uranium ion contamination from decommissioned uranium smelter tailings ponds based on phytoremediation[D]. Hengyang: South China University, 2015.(in Chinese))
- [114] POUS N, BALAGUER M D, COLPRIM J, et al. Opportunities for groundwater microbial electro-remediation[J]. *Microbial Biotechnology*, 2018, 11(1): 119-135. DOI: [10.1111/1751-7915.12866](https://doi.org/10.1111/1751-7915.12866).

Advances in groundwater pollution treatment and remediation technologies in uranium mining areas

TENG Yanguo^{1,2}, HU Jingdan¹, ZHENG Fuxin¹, DOU Junfeng¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: With the recent development of nuclear power and increasing demand for uranium resources, groundwater contamination has become a global concern from uranium production. Uranium is highly radioactive and toxic, posing a long-term potential threat to human health and the environment. Compared with other types of uranium contamination, groundwater uranium contamination has a wider spatial extent and generates higher environmental exposure and health risks. The treatment and remediation of groundwater pollution in uranium mines has become an urgent environmental problem. A comprehensive review is conducted of the basic theories, practical examples, and future development prospects of physicochemical, bioremediation and permeable reactive barrier remediation technologies based on a summary of the recent progress and achievements of groundwater pollution treatment and remediation technologies in uranium mining areas at home and abroad. Review results indicate that the physicochemical remediation technology mainly includes chemical remediation technology, electrochemical remediation technology and natural attenuation of aquifers. The application of this technology is very limited, and

its treatment products are expensive. In addition to being influenced by the regional groundwater flow field, improper treatment may easily damage the site structure and its physicochemical properties, causing secondary pollution to groundwater. Microbial remediation of uranium-contaminated groundwater can be achieved through different mechanisms of action such as microbial reduction, microbial mineralization, microbial adsorption and microbial enrichment. This remediation technology has its unique advantages in the real-time, field treatment of large contaminated water bodies and is an effective way to address uranium contamination management and sustainable development. Phytoremediation technology is economically viable, technically effective, free of secondary pollution, and less environmentally disturbing for large areas of low concentration uranium contamination, and has been more widely used. Although the permeable reactive barrier technology has been widely used in the remediation of groundwater pollution in uranium mining areas and has achieved certain remediation results. There are still some problems that affect the long-term effectiveness of permeable reactive barrier operation, such as the selection of media materials, clogging of reaction media materials and complex groundwater quality. The current in situ treatment and remediation technologies for groundwater pollution in uranium mining areas are mainly studied in the laboratory, and there is a lack of engineering practice for the treatment and remediation of groundwater pollution in actual uranium mining areas. How to develop green, efficient, and low-carbon treatment and remediation technologies in combination with the hydrogeological conditions and pollution characteristics of actual uranium mining areas is an important development direction for the treatment and remediation of groundwater pollution in uranium mining areas in the future.

Key words: uranium mining area; groundwater contamination; remediation and treatment technique; research progress