

放射性核素体表污染去除剂的研究现状

Research status of decontaminating agent of radionuclides from skin

Li Mengyi, Ning Hongxin, Hou Wenbin, Wang Yang

引用本文:

李梦艺, 宁洪鑫, 侯文彬, 等. 放射性核素体表污染去除剂的研究现状[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2023, 47(6): 384–390.

DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202207011-00311

Li Mengyi, Ning Hongxin, Hou Wenbin, et al. Research status of decontaminating agent of radionuclides from skin[J]. *International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine*, 2023, 47(6): 384–390. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202207011-00311

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202207011-00311>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

去除水体中放射性核素的磁性纳米材料的研究进展

Research progress of magnetic nanomaterials for removing radionuclides from water

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(7): 441–446 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202003014-00051>

骨靶向放射性核素治疗肺癌骨转移疼痛的研究进展

Research progress in bone-targeting radionuclides in the treatment of bone metastases from lung cancer

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(3): 189–195 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-201901046-00008>

放射性核素显像探针在细胞凋亡中的研究进展

Research progress of radionuclide imaging probes in apoptosis

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(6): 559–564, 576 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.06.015>

放射性核素标记的胆碱在PET/CT肿瘤显像中的应用

Application of radionuclide-labeled choline in PET/CT tumor imaging

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(3): 280–285 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.03.016>

放射性核素在嗜铬细胞瘤诊断与治疗中的应用进展

Advances in the application of radionuclide in the diagnosis and treatment of pheochromocytoma

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(1): 82–87 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.01.014>

放射性核素标记的金纳米颗粒在肿瘤诊疗中的研究进展

Research progress of radionuclide-labeled gold nanoparticles in the diagnosis and treatment of tumors

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(6): 383–390 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202006007-00051>

放射性核素体表污染去除制剂的研究现状

李梦艺¹ 宁洪鑫² 侯文彬² 王阳¹

¹天津中医药大学中药学院, 天津 301617; ²中国医学科学院北京协和医学院放射医学研究所, 天津市放射医学与分子核医学重点实验室, 天津 300192

通信作者: 王阳, Email: wangy9902@163.com

【摘要】 放射性核素体表污染去除是防止放射性核素进一步损伤人体的关键措施, 笔者结合国内外对放射性核素体表污染去除的策略, 总结了目前已上市和正在研究的放射性核素体表污染去除制剂, 从壳聚糖衍生物、有机磷酸类、高分子聚合物、有机骨架材料等几个方面综述了有潜力成为放射性核素体表污染去除的候选制剂, 旨在为后续研究放射性核素体表污染去除新制剂提供参考。

【关键词】 放射性同位素; 放射性污染物; 皮肤; 去污剂

基金项目: 国家自然科学基金(82104012、82202950); 中国医学科学院医学与健康科技创新工程重大协同创新项目(2021-22M-1-042)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202207011-00311](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202207011-00311)

Research status of decontaminating agent of radionuclides from skin

Li Mengyi¹, Ning Hongxin², Hou Wenbin², Wang Yang¹

¹School of Chinese Materia Medica, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; ²Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China

Corresponding author: Wang Yang, Email: wangy9902@163.com

【Abstract】 The removal of skin contamination from radioactive nuclides is a key measure to prevent further harm to the human body. Based on the strategies for removing skin contamination from radioactive nuclides at home and abroad, the authors summarize the currently available and under research decontaminating agent of radionuclides from skin, including several aspects such as chitosan derivatives, organic phosphates, polymer, organic skeleton materials, which have the potential to become candidate formulations for the removal of skin contamination from radioactive nuclides. The aim is to provide reference for future research on new formulations for the removal of skin contamination from radioactive nuclides.

【Key words】 Radioisotopes; Radioactive pollutants; Skin; Decontaminating agent

Fund programs: National Natural Science Foundation of China (82104012, 82202950); Major Collaborative Innovation Project of the Medical and Health Technology Innovation Project of the Chinese Academy of Medical Sciences (2021-22M-1-042)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202207011-00311](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202207011-00311)

放射性核素体表污染是在重大核或放射事故发生后最有可能发生的风险事件, 这种风险也同样存在于核工业、核研究及核医学等相关部门。一旦发生放射性核素泄露, 放射性核素最常见的污染区域是受放射性核素污染人员的脸、手、头发和外衣。放射性核素污染人员体表后, 造成的影响主要包括对皮肤的辐射损伤(局部损伤)和放射性核

素的二次内部(全身)吸收。皮肤对放射性核素的吸收能力波动范围较大, 经皮肤进入人体的放射性核素能随血液直接运输到全身。角质层是放射性核素的储存库和经皮吸收的介质, 表皮细胞快速分裂的生发层易受到放射性核素的影响。为避免放射性核素通过皮肤进入人体, 应于放射性核素沾染体表后尽快进行体表污染去除工作。

1 放射性核素体表污染去除的策略

近年来国外和国内有关组织或机构的建议或指南中有关放射性核素体表不同部位污染去除的策略见表1。由表1可知,常用的体表污染去除制剂包括水、肥皂水、生理盐水、洗涤剂、乙二胺四乙酸(ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)/DTPA洗剂、聚维酮碘六氯苯等,其种类和数量具有一定的局限性。

2 已上市的放射性核素体表污染去除制剂

当完整皮肤受到污染时,首先判断污染物是否为放射性核素,不是则用温和的肥皂水、漂白剂等进行去除;在确定是放射性核素后,应对不同的放射性核素使用专属的去污产品。去除铀(²³⁵U)的体表污染应使用1.5%碳酸氢钠、依替膦酸盐、杯芳烃纳米乳液;去除碘(¹³¹I)的体表污染应使用鲁哥氏碘液;去除钚(²³⁹Pu)的体表污染应使用家用漂白液或Ca-DTPA;放射性磷、钴、锌、铁、锰等其他稀土元素的体表污染应使用10%EDTA。具体见图1^[1]。

2.1 国内已上市的放射性核素体表污染去除制剂

目前,国内已上市的皮肤放射性核素污染专用清洗剂能够快速、彻底清除放射性污染物,主要供涉核工作人员用于手部和其他皮肤表面放射性污染的清洗。(1)医用核素洗消液,适用于皮肤表面与物体表面的洗消,对放射性核素碘(¹³¹I、¹²⁵I)、氟(¹⁸F)、锝(⁹⁹Tc^m)、铀(²³⁵U、²³⁸U)、磷(³²P)等及重金属污染有良好的洗消效果;(2)已上市的去污香皂、去污洗发膏、去污香波也用于放射性核素体表污染的去除;(3)辐射应急洗消箱可用于去除体表放射性核素的污染,人体体表放射性核素污染洗消药箱由三大部分构

成,包括:化学试剂、卫生用品和自制专用洗消剂,其中前两个部分为符合国家及行业标准的产品,自制专用洗消剂以特种螯合剂DTPA为主剂,用其配制成Schubert液和复方洗消液等放射性核素污染特效洗消剂,同时制成去污洗发水和洗手膜。

2.2 国外已上市的放射性核素体表污染去除制剂

(1)美国军方提供的皮肤去污套件为M291皮肤去污套件,其包括一个钱包状的携带袋,其中包含6个单独的去污包,可重复使用3次。(2)Radiacwash™系列辐射净化套件旨在通过双向作用快速捕获放射性核素并去除,目前该系列已上市的产品包括:Radiacwash™喷雾、家庭应急包、NukeKit¹高级单人核辐射防护包等。(3)“SHUDHIK”皮肤去污试剂盒^[6]用于去除完整皮肤上(10±2)%的⁹⁹Tc^m,去污效率实验结果表明有搓洗的洗涤方式比无摩擦的温和洗涤方式的去污效率提高了5%。(4)“DERMADECON”皮肤去污试剂盒^[7]在大鼠皮肤与人手皮肤中去污率的实验结果表明,该试剂盒对⁹⁹Tc^m、铊(²⁰¹Tl)和¹³¹I均有良好的去污作用。(5)Rad-Con™去污剂主要用于皮肤去污,不含皮肤刺激物。使用时其产生的泡沫可迅速地去除来自工作区域和皮肤的所有类型的放射性核素污染。(6)Radi-Clean™喷雾去污剂的主要成分是微碱性物质,可有效去除放射性核素污染。去污洗手液用于清除放射性核素污染,防止其转移和扩散,其不含皮肤刺激物、易与水混合、可置于液体肥皂分配器中。

3 正在研究的放射性核素体表污染去除制剂

近二十年来,研究人员对传统放射性核素体表污染去除制剂进行了改进,包括优化原有配方、开发新剂型等。

表1 国外和国内有关组织或机构放射性核素体表不同部位污染去除策略

Table 1 Strategies for removing contamination from different parts of the skin of radioactive nuclides by foreign and domestic organizations or institutions

组织或机构 ^[文献]	完整皮肤	受伤皮肤	耳部	头发
法国核安全局 ^[1]	温和肥皂水和DTPA洗剂	DTPA洗剂	10%DTPA洗剂	温和肥皂水
美国国家辐射防护与测量委员会 ^[2]	水、肥皂或洗涤剂+螯合剂(EDTA/DTPA)	洗涤剂+局部麻醉剂(4%利多卡因)	-	剃须刀
美国疾病控制与预防中心 ^[3]	温和肥皂水	-	温和肥皂水	温和肥皂水
美国国土安全部 ^[4]	水、肥皂水和3%聚维酮碘六氯苯	水、肥皂水和3%聚维酮碘六氯苯	-	无护发素的洗发水
国际原子能机构 ^[1]	温水和低酸度的普通肥皂或洗涤剂	生理盐水	等渗盐水	洗发水或剃须刀
美国武装部队放射生物学研究所 ^[1]	水、肥皂和0.5%漂白剂	-	水或生理盐水	水和肥皂
中国疾病预防控制中心 ^[5]	温水、去污剂	生理盐水或去污剂+局部麻醉剂(1%~2%利多卡因)	生理盐水、去污剂	水、肥皂、去污剂

注: -表示无此项数据。DTPA为二亚乙基三胺五乙酸; EDTA为乙二胺四乙酸

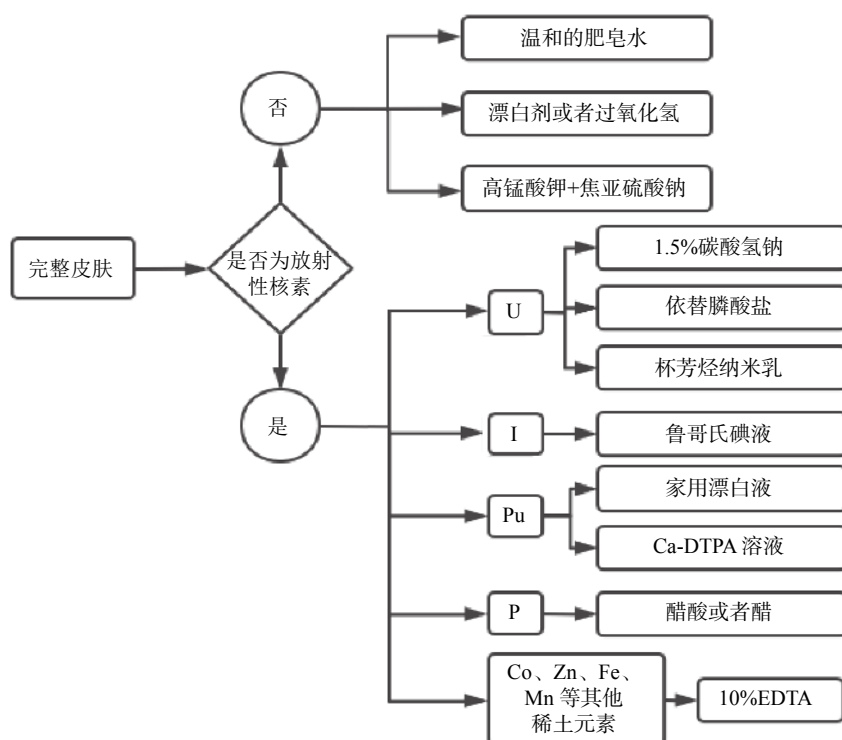


图1 放射性核素体表污染去除流程图 DTPA 为二亚乙基三胺五乙酸; EDTA 为乙二胺四乙酸

Figure 1 Flowchart of the removal of skin contamination from radioactive nuclides

EDTA 和 DTPA 是常用于放射性核素体表污染去除的成分, EDTA 是一种螯合剂, 其作用机制是与放射性核素形成络合物以达到清除污染的目的。美国食品药品监督管理局批准的去镭、镭和钷污染的制剂是 DTPA 钙盐或锌盐。杯芳烃也受到许多科研人员的关注, 多种不同配方的杯芳烃纳米乳剂逐渐被研发出来。亚甲基二磷酸和羟基吡啶酮类化合物也逐渐被人们所认知。现对近年来正在研究的放射性核素体表污染去除制剂综述如下。

3.1 EDTA 洗剂

Rana 等^[8] 制备了一种 EDTA 洗剂, 以⁹⁹Tc^m、¹³¹I 和²⁰¹Tl 为污染物, 将大鼠皮肤和人体组织等效模型暴露在污染物中 1 h, 实验结果显示该 EDTA 洗剂对¹³¹I、²⁰¹Tl 和⁹⁹Tc^m 的去污效率分别为(90±5)%、(80±2)% 和(85±2)%。原维鸿等^[9] 研制出一种以 EDTA 为主剂, 能有效去除皮肤上钴、锰等放射性核素污染的去污剂, 皮肤冷态去污实验结果显示, 相较于蒸馏水, 该去污剂对钴、锰的去污效率明显提高。马丽等^[10] 研发了一种 EDTA 洗消液, 该洗消液对皮肤和伤口没有刺激性, 去污效率高, 仅产生少量二次污染, 主要用于核工业、核电、核反应堆等工作人员紧急情况下的皮肤去污。

3.2 EDTA 水凝胶

苏州大学放射医学研究所研究人员发明了一种水凝胶, 能够快速并有效地去除各种放射性核素造成的体表污染^[11]。其理化性质稳定, 成膜速度快, 胶膜黏度强, 有韧

性, 易剥离, 对皮肤无刺激性。这种皮肤去污的新型制剂与以往洗消剂不同, 在保证去污效率的同时也改善了二次污染的问题。

3.3 EDTA 去污乳膏

Khan 等^[12] 研发出一种以 EDTA 为主剂的放射性核素去污乳膏, 将大鼠皮肤暴露在⁹⁹Tc^m 放射性污染物环境下 30 min 后, 用 SPECT 扫描记录去污前后的静态计数, 结果显示放射性核素去污乳膏的去污效率为(42±3)%。

3.4 DTPA 洗剂

Tazart 等^[13] 进行了对镅(²⁴¹Am) 污染皮肤的去污实验, 以冷冻和新鲜猪皮为模型, 用水、富勒土和 DTPA 进行去污实验。实验结果显示, DTPA 仍是去除皮肤上²⁴¹Am 污染的最有效的治疗方法, 但污染 2 h 后的去污效果不明显。Rana 等^[14] 配制了一种 DTPA 洗剂, 以大鼠的胸腹皮肤为模型, 以⁹⁹Tc^m 和²⁰¹Tl 为污染物, 评估该种 DTPA 洗剂的去污效果。结果显示, 该洗剂能够有效地去除皮肤表面的污染物, 其对⁹⁹Tc^m 和²⁰¹Tl 的去污效率分别为(85±5)% 和(88±2)%。

3.5 DTPA 水凝胶

Tazart 等^[15] 研制了一种 DTPA 去污水凝胶, 对猪耳皮肤的去污实验结果显示, 该去污水凝胶对锶系放射性核素污染的有效去除率可达 90%, 对于²⁴¹Am 和²³⁹Pu 污染, 该 DTPA 去污水凝胶的去污效率优于水。Zhang 等^[16] 制备了 DTPA 五乙酯水凝胶并进行透皮给药, 研究人员采用²⁴¹Am 伤口污染模型, 在污染后 24 h 单次局部使用 C₂E₅ 水凝胶,

结果表明 C₂E₅ 水凝胶有明显的去污效果, 无皮肤异常或皮肤刺激现象出现。崔凤梅等^[17] 开发了一种以 DTPA 钠盐为主剂去除皮肤伤口放射性核素污染的新型水凝胶, 该新型水凝胶的交联方式是纯物理交联, 没有细胞和皮肤毒性, 能够有效清除皮肤伤口上的放射性核素。Cui 等^[18] 以聚丙烯酰胺、海藻酸钠和 DTPA 为原料, 制备了一种水凝胶, 该水凝胶表现出良好的力学性能和溶胀性能。体外试验结果显示, 该水凝胶对锶(⁸⁹Sr)和铯(¹³⁷Cs)具有显著的清除能力; 体内实验结果表明, 该水凝胶能去除小鼠皮肤伤口中的⁸⁹Sr, 并能有效阻止⁸⁹Sr 通过皮肤伤口被吸收。

3.6 杯芳烃纳米乳液

杯芳烃一般是指由亚甲基桥连苯酚单元所构成的大环化合物, 因其结构像一个酒杯而被称为杯芳烃, 杯芳烃具有大小可调节的“空腔”^[19], 可作为去除皮肤上放射性核素铀的有效制剂。

Spagnul 等^[20] 开发了一种杯芳烃纳米乳液, 研究结果显示, 该杯芳烃纳米乳液减少了约 98% 的²³⁵U 通过完整皮肤和伤口进行的扩散。有研究者利用二次离子质谱(SIMS)技术观察角质层中铀的累积, 结果显示皮肤被铀污染 24 h 后, 二次离子质谱(SIMS)离子图像中没有发现铀的累积, 表明杯芳烃纳米乳液定量提取了沉积在受伤皮肤上的铀^[21]。Rana 等^[22] 筛选出 p-叔丁基杯 [4] 芳烃和赋形剂的最优配方, 利用药物闪烁照相技术证实了 p-叔丁基杯 [4] 芳烃纳米乳液对⁹⁹Tc^m、¹³¹I 和²⁰¹Tl 具有去污作用。另有细胞毒性研究结果证实了 p-叔丁基杯 [4] 芳烃纳米乳液去除放射性核素污染的有效性和安全性^[23]。Grivès 等^[24] 发现, 相比于肥皂水, 载有杯芳烃的纳米乳液具有显著的去除铀的作用。Belhomme-Henry 等^[25] 用剥皮猪耳外植体进行皮肤扩散实验, 研究结果显示, 铀酰离子在皮肤伤口的扩散量在 5% 以下。Phan 等^[26] 研制了一种专用于身体和头发去污的杯芳烃纳米乳液, 该乳液适合于小面积和局部皮肤的去污。

3.7 羟基亚乙基二膦酸

羟基亚乙基二膦酸的环状结构有利于螯合放射性核素^[27]。Tymen 等^[28] 的研究结果显示, 羟基亚乙基二膦酸溶液比 DTPA 溶液更能有效去除铀和钚。崔凤梅^[29] 用 DTPA、羟基亚乙基二膦酸、甘胆酸钠和水探索出了去污效果最佳的配方, 研发制成了去污皂和去污湿巾, 对⁸⁹Sr、²³⁵U 和¹³⁷Cs 均有良好的去污效果。

3.8 羟基吡啶酮类

多种双齿螯合剂如 3-羟基吡啶-4-酮、1-羟基吡啶-2-酮、3-羟基吡啶-2-酮等对重金属离子有较高的亲和力。Li 等^[30] 发现, 羟基吡啶酮和吡啶甲酸配体能有效螯合铜系核素钍(²³²Th)。Buglyó 等^[31] 进行了溶液平衡研究, 结果显示 3-羟基-2-甲基-4-吡喃酮及其 2 个衍生物是 Pb²⁺有效的螯

合剂。Wang 等^[32] 研究结果显示, 3-羟基-2-吡咯烷酮能有效去除皮肤表面的²³⁵U, 且毒性小于临床上使用的螯合剂 [即 DTPA-ZnNa₃ 和 3-羟基-1,2-二甲基-4(1H)-吡啶酮]。缪玉^[33] 将 3,2-羟基吡啶酮(3,2-HOPO)修饰到荧光碳量子点(carbon quantum dots, CQDs)上得到 CQDs-HOPO, 模拟洗消实验结果表明 CQDs-HOPO 能高效去除皮肤表面的²³⁵U, 且与²³⁵U 络合后形成不易渗透皮肤的团聚物。

4 具有潜力的放射性核素体表污染去除制剂

近些年, 研究者发现壳聚糖衍生物、有机磷酸类、高分子聚合物、有机骨架材料等新型材料具有去除放射性核素和重金属污染的作用, 由于其与核素相亲和的特性, 其在体内核素的去除上具有较好的应用效果, 笔者认为其在体表核素污染的去除中也具有潜在的应用价值。

4.1 壳聚糖衍生物

壳聚糖是一种天然可降解的新型功能性高分子材料^[34], 其结构中存在着游离的氨基、羟基和还原端羰基, 可通过化学配位作用螯合 Pd²⁺、Cu²⁺、UO₂²⁺等重金属离子。梁飞等^[35] 制备了壳聚糖水凝胶, 对重金属有良好的吸附作用。冯颖等^[36] 利用紫外分光光度法研究得出, 壳聚糖中氨基与 Cu²⁺ 发生螯合作用, 调节 pH 值可使壳聚糖-铜螯合物析出。

4.2 有机磷酸类

六磷酸肌醇广泛存在于天然的全谷食物中, Cebrian 等^[37] 发现, 相较于 DTPA, 六磷酸肌醇对²³⁵U 有更强的亲和力, 可用作潜在的体表放射性核素污染去污剂。Xu 等^[38] 用双磷酸和 DTPA 制备了超分子水凝胶, 实验结果显示, 采用超分子水凝胶处理过的背部伤口被铀污染的小鼠的存活率明显高于未作处理的小鼠, 但该研究缺少安全性实验进行验证。

4.3 高分子聚合物

高可溶性聚乙烯亚胺在药物化学领域中得到了深入地探究, 其靶向去除功能容易实现。有研究结果显示, 使用羧酸盐大分子官能化聚乙烯亚胺后, 其具有较好的肝脏和骨骼的靶向性, 可去除钍和钷等核素^[39]。Lahrouch 等^[40] 采用大分子螯合方法探究了甲基羧化的聚乙烯亚胺与²³⁵U 和²³²Th 的络合能力, 结果显示其能有效去除²³⁵U 和²³²Th, 但目前还缺乏相关皮肤实验。Gok 等^[41] 以钙和海藻酸钠为原料制备了海藻酸钙生物聚合物珠(CaABBs), 体外实验结果显示, 海藻酸钙生物聚合物珠(CaABBs)对放射性核素(⁸⁵Sr、²³⁸U、²³⁴Th)的吸收效率可达到(90±3)%。

4.4 有机骨架材料

金属有机骨架(metal organic framework, MOF)是由有机配体和金属离子(或金属簇)通过配位作用自组装而成的有机-无机多孔晶体材料^[42], MOF 纳米粒子对²³⁵U 的亲和力强。王爻凹等^[43] 以 MOF 为基础材料制备了 MOF 纳米粒

子,该纳米粒子中存在大量的羧酸基,能迅速与铀酰离子结合。共价有机骨架(COF)是由有机配体通过共价键形成的有机多孔结晶聚合物^[44],其孔道结构能与 UO_2^{2+} 、 Cr^{2+} 、 Γ 、 Hg^{2+} 等放射性核素结合。白茹^[45]制备了以共价有机骨架(COF)为原材料的功能化共价有机纳米片,在pH值为7.4的条件下其对铀酰离子的去污率可达到90%。

4.5 天然产物

目前鲜有关于天然产物去除放射性核素污染的报道。郭俊华^[46]采用微胶囊技术,以天然皂粉、无患子皂苷、茶皂素为原料制备了多功能速溶天然洗衣皂片,其具有消毒、灭菌、消炎、护肤等功能。采用天然来源的材料制备去污制剂和产品应用于核事故的应急和救治是一项非常有意义的研究课题。

5 其他

周星保^[47]采用烷基糖苷、 α -烯基磺酸钠、羧甲基纤维素、海藻酸钠、EDTA等制备了烷基糖苷基泡沫去污剂,其能有效去除放射性核素污染。黄顶强等^[48]利用甲基丙烯酸缩水甘油酯与二乙烯三胺反应得到改性木薯淀粉重金属螯合剂,发现其在弱酸条件下可与重金属离子(Cu^{2+} 、 Cr^{2+})通过配位结合形成稳定的螯合沉淀产物,但该研究缺少相关皮肤实验以证明其在皮肤上的安全性。

6 小结与展望

综上所述,传统放射性核素体表污染去除制剂存在广谱性差、二次污染等问题;正在研究的放射性核素体表污染去除制剂中的去污水凝胶具有易使用、方便携带和二次污染少的特点;杯芳烃纳米乳液对去除放射性核素铀污染的效果良好。壳聚糖衍生物、有机磷酸类、高分子聚合物、有机骨架材料等具有潜力的放射性核素体表污染去除材料仍有诸多问题有待深入探究,如完善皮肤刺激性实验、皮肤毒性实验、皮肤过敏实验和经皮渗透实验等,以进一步证明其在皮肤上的安全性和有效性。目前,新型放射性核素去污制剂的研究大多停留在配方设计、去污效率评价等阶段,新型去污制剂针对大面积污染的去污能力有待进一步提升。期待今后能优化并开发新型的去污制剂,以改善去污面积小、二次污染等问题,且能投入工业化生产并广泛运用于放射性核事故及日常涉核工作者的辐射防护工作中。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 李梦艺负责文献的收集、综述初稿的撰写;宁洪鑫负责综述的修改;侯文彬、王阳负责写作思路的拟定、综述撰写的指导

参 考 文 献

- [1] Tazart A, Bérard P, Leiterer A, et al. Decontamination of radionuclides from skin: an overview[J]. *Health Phys*, 2013, 105(2): 201–207. DOI: 10.1097/HP.0b013e318290c5a9.
- [2] National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report No.65: management of persons accidentally contaminated with radionuclides[R]. Bethesda, Maryland: NCRP, 1980.
- [3] Ansari A, Caspary K. Guide to operating public shelters in a radiation emergency[EB/OL]. (2015-02). [2022-07-12]. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/28995>.
- [4] U.S. Department of Homeland Security. Guide for the selection of biological, chemical, radiological, and nuclear decontamination equipment for emergency first responders[R]. Washington: DHS, 2007.
- [5] 中国疾病预防控制中心. 中华人民共和国国家卫生健康标准委员会人体体表放射性核素污染处理规范征求意见稿[EB/OL]. (2021-09-04).[2022-07-12]. https://www.chinacdc.cn/tzgg/xj/202109/t20210904_235922.html. Chinese Center for Disease Control and Prevention. National Health Commission of the People's Republic of China, Radionuclides decontamination standards for body surface, Exposure Draft[EB/OL].(2021-09-04).[2022-07-12]. https://www.chinacdc.cn/tzgg/202109/t20210904_235922.html.
- [6] Rana S, Dutta M, Soni NL, et al. Decontamination of human and rabbit skin experimentally contaminated with ^{99m}Tc radionuclide using the active components of "Shudhika"—a skin decontamination kit[J]. *Prehosp Disaster Med*, 2012, 27(2): 162–166. DOI: 10.1017/S1049023X1200057X.
- [7] Nishad DK, Bhalla S, Khanna K, et al. Decontamination of rat and human skin experimentally contaminated with ^{99m}Tc , ^{201}Tl and ^{131}I radionuclides using "Dermadecon"—a skin decontamination kit: an efficacy study[J]. *Cutan Ocul Toxicol*, 2018, 37(1): 1–8. DOI: 10.1080/15569527.2017.1315127.
- [8] Rana S, Bhatt S, Dutta M, et al. Radio-decontamination efficacy and safety studies on optimized decontamination lotion formulation[J]. *Int J Pharm*, 2012, 434(1/2): 43–48. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2012.05.003.
- [9] 原维鸿,沈先荣,刘琼,等. 钴锰放射性核素皮肤沾染去污剂的初步研制[J]. *解放军医学杂志*, 2018, 43(1): 69–74. DOI: 10.11855/j.issn.0577-7402.2018.01.14. Yuan WH, Shen XR, Liu Q, et al. Preparation of decontaminant for skin radioactive isotopes contamination of Co^{2+} and Mn^{2+} [J]. *Med J Chin People's Liberation Army*, 2018, 43(1): 69–74. DOI: 10.11855/j.issn.0577-7402.2018.01.14.
- [10] 马丽,雷呈祥,王庆蓉. 一种放射性皮肤沾染洗消液及其洗消包: 中国, 101732341A[P]. 2010-06-16. Ma L, Lei CX, Wang QR. A decontamination solution for radioactive skin contamination and its decontamination package:

- CN, 101732341A[P]. 2010-06-16.
- [11] 符荣初, 宋妙发. 皮肤放射性沾染的无水去污胶: 中国, 1644671A[P]. 2005-07-27.
- Fu RC, Song MF. Anhydrous decontamination glue with radioactive skin contamination: CN, 1644671A[P]. 2005-07-27.
- [12] Khan AW, Kotta S, Rana S, et al. Skin decontamination cream for radiological contaminants: formulation development and evaluation[J]. *Int J Pharm Investig*, 2013, 3(1): 54–59. DOI: 10.4103/2230-973X.108964.
- [13] Tazart A, Bolzinger MA, Moureau A, et al. Penetration and decontamination of americium-241 *ex vivo* using fresh and frozen pig skin[J]. *Chem Biol Interact*, 2017, 267: 40–47. DOI: 10.1016/j.cbi.2016.05.027.
- [14] Rana S, Dutta M, Sharma N, et al. Scintigraphic evaluation of decontamination lotion for removal of radioactive contamination from skin[J]. *Disaster Med Public Health Prep*, 2014, 8(2): 130–135. DOI: 10.1017/dmp.2014.17.
- [15] Tazart A, Bolzinger MA, Lamart S, et al. Actinide-contaminated skin: comparing decontamination efficacy of water, cleansing gels, and DTPA gels[J]. *Health Phys*, 2018, 115(1): 12–20. DOI: 10.1097/HP.0000000000000814.
- [16] Zhang Y, Sadgrove MP, Mumper RJ, et al. Radionuclide decorporation: matching the biokinetics of actinides by transdermal delivery of pro-chelators[J/OL]. *AAPS J*, 2013, 15(4): 1180–1188[2022-07-12]. <https://link.springer.com/article/10.1208/s12248-013-9527-x>. DOI: 10.1208/s12248-013-9527-x.
- [17] 崔凤梅, 胡亮, 李永, 等. 一种放射性核素沾染去污的水凝胶、制备方法及应用: 中国, 110483694A[P]. 2019-11-22.
- Cui FM, Hu L, Li Y, et al. A new radionuclide decontamination hydrogel, preparation method and application: CN, 110483694A [P]. 2019-11-22.
- [18] Cui FM, Wu ZJ, Zhao R, et al. Development and characterization of a novel hydrogel for the decontaminating of radionuclide-contaminated skin wounds[J]. *Macromol Biosci*, 2021, 21(5): e2000399. DOI: 10.1002/mabi.202000399.
- [19] Grappin L, Berard P, Menetrier F, et al. Treatment of actinide exposures: a review of Ca-DTPA injections inside CEA-COGEMA plants[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2007, 127(1/4): 435–439. DOI: 10.1093/rpd/ncm296.
- [20] Spagnul A, Bouvier-Capely C, Phan G, et al. A new formulation containing calixarene molecules as an emergency treatment of uranium skin contamination[J]. *Health Phys*, 2010, 99(3): 430–434. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181d1a1b6.
- [21] Spagnul A, Bouvier-Capely C, Phan G, et al. *Ex vivo* decrease in uranium diffusion through intact and excoriated pig ear skin by a calixarene nanoemulsion[J]. *Eur J Pharm Biopharm*, 2011, 79(2): 258–267. DOI: 10.1016/j.ejpb.2011.05.004.
- [22] Rana S, Sharma N, Ojha H, et al. *p*-Tertbutylcalix[4]arene nanoemulsion: preparation, characterization and comparative evaluation of its decontamination efficacy against Technetium-99m, Iodine-131 and Thallium-201[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2014, 117: 114–121. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2014.02.001.
- [23] Sharma N, Ojha H, Pathak DP, et al. Ex-vivo complexation, skin permeation, interaction and cytodermal toxicity studies of *p*-tertbutylcalix[4]arene nanoemulsion for radiation decontamination[J]. *Life Sci*, 2017, 168: 65–76. DOI: 10.1016/j.lfs.2016.11.007.
- [24] Grivès S, Phan G, Bouvier-Capely C, et al. Compared *in vivo* efficiency of nanoemulsions unloaded and loaded with calixarene and soapy water in the treatment of superficial wounds contaminated by uranium[J]. *Chem Biol Interact*, 2017, 267: 33–39. DOI: 10.1016/j.cbi.2016.11.030.
- [25] Belhomme-Henry C, Phan G, Huang N, et al. Texturing formulations for uranium skin decontamination[J]. *Pharm Dev Technol*, 2014, 19(6): 692–701. DOI: 10.3109/10837450.2013.823991.
- [26] Phan G, Semili N, Bouvier-Capely C, et al. Calixarene cleansing formulation for uranium skin contamination[J]. *Health Phys*, 2013, 105(4): 382–389. DOI: 10.1097/HP.0b013e318298e8d3.
- [27] 周文华, 尹晶晶, 高洁, 等. 体内铀毒性及其新型促排剂研究进展[J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31(3): 379–385. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.03.023.
- Zhou WH, Yin JJ, Gao J, et al. Research advances in toxicity of uranium *in vivo* and its new chelators[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31(3): 379–385. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.03.023.
- [28] Tymen H, Gerasimo P, Hoffschir D. Contamination and decontamination of rat and human skin with plutonium and uranium, studied with a Franz's chamber[J]. *Int J Radiat Biol*, 2000, 76(10): 1417–1424. DOI: 10.1080/09553000050151709.
- [29] 崔凤梅. 用于放射性核素沾染去污的组合物及其制备方法与用途: 中国, 112494368A[P]. 2021-03-16.
- Cui FM. Composition for radionuclide contamination and decontamination and its preparation method and application: CN, 112494368A[P]. 2021-03-16.
- [30] Li Y, Hamlin D, Chyan M, et al. Evaluation of [²²⁷Th]thorium chelation of hydroxypyridinone- and picolinic acid-containing ligands to simulate ²²⁶Th chelation[J]. *Nucl Med Biol*, 2019, 72-73(S1): S38. DOI: 10.1016/S0969-8051(19)30295-1.
- [31] Buglyó P, Bíró L, Nagy I, et al. Hydroxypyronate, thiohydroxypyronate and hydroxypyridinonate derivatives as potential Pb²⁺ sequestering agents[J]. *Polyhedron*, 2015, 92: 7–11. DOI: 10.1016/j.poly.2015.03.006.
- [32] Wang XM, Wu SQ, Guan JW, et al. 3-hydroxy-2-pyrrolidinone as a potential bidentate ligand for *in vivo* chelation of uranyl with low cytotoxicity and moderate decorporation efficacy: a solution thermodynamics, structural chemistry, and *in vivo* uranyl removal survey[J]. *Inorg Chem*, 2019, 58(5): 3349–3354. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b03442.

- [33] 缪玉. 功能化纳米材料在锕系元素体表洗消和体内促排中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2021.002450.
- Miao Y. Development of functionalized nanomaterials as actinide decontamination and decorporation agents[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2021.002450.
- [34] 张金生, 田中禾, 李丽华, 等. 壳聚糖及其衍生物在水处理中的应用[J]. 化工新型材料, 2019, 47(2): 51-55.
- Zhang JS, Tian ZH, Li LH, et al. Application of chitosan and its derivative in water treatment[J]. New Chem Mater, 2019, 47(2): 51-55.
- [35] 梁飞, 谢贤鑫, 杨盟. 多功能壳聚糖水凝胶医用材料的功能性研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(2): 240-243, 248. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.02.055.
- Liang F, Xie XX, Yang M. Study on functionality of multifunctional chitosan hydrogel[J]. New Chem Mater, 2021, 49(2): 240-243, 248. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.02.055.
- [36] 冯颖, 张庆瑾, 王珏程, 等. pH对壳聚糖螯合铜(II)的螯合机理及稳定常数的影响[J]. 过程工程学报, 2020, 20(6): 646-654. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219299.
- Feng Y, Zhang QJ, Wang JC, et al. Effect of pH on the chelating mechanism and stability constant of chitosan-Cu(II) chelate complex[J]. Chin J Process Eng, 2020, 20(6): 646-654. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219299.
- [37] Cebrian D, Tapia A, Real A, et al. Inositol hexaphosphate: a potential chelating agent for uranium[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2007, 127(1/4): 477-479. DOI: 10.1093/rpd/nem356.
- [38] Xu KM, Ge WW, Liang GL, et al. Bisphosphonate-containing supramolecular hydrogels for topical decorporation of uranium-contaminated wounds in mice[J]. Int J Radiat Biol, 2008, 84(5): 353-362. DOI: 10.1080/09553000802029902.
- [39] Lahrouch F, Siberchicot B, Leost L, et al. Polyethyleneimine methylenecarboxylate: a macromolecular DTPA analogue to chelate plutonium (IV)[J]. Chem Commun (Camb), 2018, 54(83): 11705-11708. DOI: 10.1039/c8cc05206a.
- [40] Lahrouch F, Chamayou AC, Creff G, et al. A combined spectroscopic/molecular dynamic study for investigating a methyl-carboxylated PEI as a potential uranium decorporation agent[J]. Inorg Chem, 2017, 56(3): 1300-1308. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b02408.
- [41] Gok C, Gerstmann U, Höllriegl V, et al. Preparation of Ca-alginate biopolymer beads and investigation of their decorporation characteristics for ^{85}Sr , ^{238}U and ^{234}Th by *in vitro* experiments[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2013, 153(1): 47-55. DOI: 10.1093/rpd/ncs088.
- [42] 商海波. 金属有机骨架 UiO-66 和共价有机骨架 TpPA-1 用于固相微萃取及气相色谱[D]. 天津: 南开大学, 2016. DOI: 10.7666/d.Y3157940.
- Shang HB. Metal organic framework UiO-66 and covalent organic framework TpPA-1 were used for solid phase microextraction and gas chromatography[D]. Tianjin: Nankai University, 2016. DOI: 10.7666/d.Y3157940.
- [43] 王爻凹, 第五娟, 王晓梅, 等. MOF 纳米粒子在制备放射性核素促排剂中的应用: 中国, 110354269A[P]. 2019-10-22.
- Wang SA, Di WJ, Wang XM, et al. Application of MOF nanoparticles in the preparation of radionuclide decorporation agents: CN, 110354269A[P]. 2019-10-22.
- [44] 张关印, 关清卿, 庙荣荣, 等. 共价有机骨架材料的合成及应用[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13215-13226. DOI: 10.11896/cldb.19080093.
- Zhang GY, Guan QQ, Miao RR, et al. Synthesis and application of covalent organic frameworks[J]. Mater Rep, 2021, 35(13): 13215-13226. DOI: 10.11896/cldb.19080093.
- [45] 白茹. 铀酰的膦酸配合物及通过功能化共价有机纳米片促排[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
- Bai R. Uranyl phosphonic acid complexes and its functionalized covalent organic nanosheets were removed *in vivo*[D]. Hengyang: University of South China, 2020.
- [46] 郭俊华. 多功能速溶天然洗衣皂片的研究与制备[J]. 中国洗涤用品工业, 2016, (12): 48-54. DOI: 10.16054/j.cnki.cci.2016.12.005.
- Guo JH. Research and production of multi-functional instant natural laundry soap flakes[J]. China Clean Ind, 2016, (12): 48-54. DOI: 10.16054/j.cnki.cci.2016.12.005.
- [47] 周星保. 用于去除放射性核素污染的生物基泡沫去污剂的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- Zhou XB. The study on biomass-based foam decontaminant for removing radionuclides on polluted surface[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016.
- [48] 黄顶强, 叶昆朋, 解博, 等. 改性木薯淀粉重金属螯合剂的合成及其应用[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): S369-371, 375. DOI: 10.13205/j.hjgc.2014.s1.156.
- Huang DQ, Ye KP, Xie B, et al. Synthesis and use of modified cassava starch-heavy metal chelant[J]. Environ Eng, 2014, 32(S1): S369-371, 375. DOI: 10.13205/j.hjgc.2014.s1.156.

(收稿日期: 2022-07-13)