

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.01.013

不同地层中放射性核素迁移模型

邹威燕,周书葵,段毅

(南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:从核污染出发,对深浅不同地质层的核迁移影响因素进行了分析,考虑了浓度和周围环境两个方面的影响,总结了可适用于不同地质层的天然迁移模型以及相对应的迁移机制,最后分析了各个模型存在的问题,并对模型进行了展望。

关键词:核素;天然迁移模型;迁移机制;存在的问题

中图分类号:X82 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2022)01-0079-09

Migration Model of Radionuclides in Different Formations

ZOU Wei-yan, ZHOU Shu-kui, DUAN Yi

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: From perspective of nuclear pollution, influencing factors of nuclear migration in different geological layers were analyzed. Natural migration models suitable for different geological layers and corresponding migration mechanisms were summarized by considering influence of concentration and surrounding environment. The problems existing in each model were analyzed and the model was prospected.

Key words: nuclide; natural migration model; migration mechanism; existing problems

随着核工业不断发展,核燃料需求量不断增长,铀矿开采产生的铀尾矿数量持续增加^[1]。一方面,未来我国预计将产生近千吨的高水平放射性废物,高放废物是指释热率大于 2 kW/m^3 ,长寿命核素大于短寿命核素上限值的废物,具有放射性水平高、释放热量大、污染范围广等特征^[2];另一方面,废弃铀尾矿附近通常具有极端裸露、植被稀少、水土流失严重等特征,尾矿废石中的有毒物质极易通过地表、地下径流和大气扩散等方式对周围环境造成污染^[3]。定量评价核素在地下复杂地质体中的迁移方式、机理、影响因素及污染的扩散范围等具有重要的意义,也是研究放射性核素处置方法的重要指标^[4]。陈永贵等^[5]在总结了胶体与核素之间的共迁移试验、迁移特性和作用机理等方面后发现,已有成果难以评

价胶体对核素的吸附能力以及胶体的迁移能力;肖钧升^[6]利用数值模拟软件研究了核素在岩体破碎区的迁移扩散特性;GRIGALIUNIEN等^[7]考察评估反应堆金属废物中放射性核素的释放和探究了核素在深层地质处置结晶岩石中的迁移。

1 放射性核素在土壤中的迁移

1.1 近地表迁移的发展趋势

20世纪以来,国内外研究学者针对高放废物处置已经提出了各种各样的方法,如偏远海岛处置、再加工处理、深钻孔处置等^[8-12]。这些方法具有处理效果好、不易对环境造成污染等优点,形成了乏燃料后处理和在地质储存处理的共识。包气带是后处理厂和地表处置场的纽带,连接附近的危险源和地下

收稿日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174117);湖南省教育厅科研平台项目(15K106);湖南创新平台开放基金项目(17K078)

作者简介:邹威燕(1998-),女,江苏徐州人,硕士研究生;通信作者:周书葵(1965-),男,湖南衡阳人,教授

水^[13]。随着美国、法国、中国等国家广泛开展乏燃料后处理和近地表处置计划,包气带核素迁移被列为选址阶段的重点研究内容^[14],研究包气层的非饱和流动性、化学和物理输运特性及场运输行为,以提供有关包气层延缓放射性核素迁移能力的信息^[15]。同时经过实验室测试证明,核素可以通过包气带内的物理和化学过程吸附和还原到一定程度^[16]。

1.2 迁移的影响因素

核素在土壤中的迁移是多种因素相互作用的结果,其中非饱和土壤孔隙水和自由水含量的影响最显著。左自波等^[17]采用不同降雨模式对非饱和土中污染物迁移进行研究,发现间断降雨污染物入渗浓度高于连续降雨,且随着降雨逐渐减少。ZHANG等^[18]模拟不同降雨强度下核素的渗流过程,发现降雨在大时间尺度上核素迁移速度显著增加。蒋文波等^[19]在研究尾矿区废石时发现,雨淋作用下表层²³⁸U、²²⁶Ra活度最高,随着深度增加核素活度逐渐减少。此外,雨水pH影响U的赋存形态及土壤表面的官能团。REN等^[20]发现,在弱酸性和中性条件下,U和OH⁻相结合形成UO₂(OH)₂沉淀。KORICHI等^[21]证实了这一观点,并利用MINTEQA2程序模拟预测U(VI)水相形态,表明U在酸性条件下会和水相物种(UO₂²⁺、UO₂OH⁺)发生反应。王文凤等^[22]发现,在铀的同一粒径下,铀的析出随pH的增大而减小,当浸泡液呈弱酸性时,游离CO₂易与铀酰离子反应生成UO₂CO₃,从而改变铀元素的赋存形式。核素在地下环境中的迁移除受到降雨影响外还受其他因素的影响,如地质条件^[23]、胶体^[24]、环境pH^[25]、共存离子^[26]、离子强度^[27]及介质粒径分布等。

2 深地质的迁移

2.1 地气迁移技术的发展

深层地质处置采用多重屏障系统,利用天然地质屏障的被动安全功能,保证处置系统的稳定性,以实现一定时期内放射性核素不会迁移至生物圈^[28]。但是地质屏障并不是一个完全封闭的系统,它的各个结构组成中都含有孔隙,核素在覆盖层中的迁移可看作是元素自身扩散及在多孔介质中运移的结果。当元素颗粒达到纳米粒度后,其表面原子具有较高活性,容易吸收气体分子形成吸收层,从而获得较强的扩散能力和迁移能力^[29]。Kristianson利用这一现象提出了关于地气迁移的假说,童纯菡等在国内首次对这种迁移方式进行探索(地气流的迁移

形式、所携带的物质形式、形成机理等^[30-33]),这些研究都为地气法元素垂向运移提供了依据,表明了地气是隐蔽地形中适宜的迁移介质,并为地气测量技术应用与实际提供了坚实可能。

2.2 地气技术在核素迁移的应用

土壤是勘探活动中最常见的采样介质,许多研究表明,隐伏矿床上的土壤具有能反映深部矿体异常的能力。陈刚^[34]首次构建地气迁移土柱模型,设计一定高度的土壤层,加入模拟核废物的活化中子,证实了放射性核素会随地气流向上迁移的客观事实。试验中还发现核废物迁移也会受到核固化程度、气体流速、土壤空隙度、覆盖层厚度等因素的影响;罗齐彬^[35]在陈刚的基础上进一步证实,铀元素在多孔岩土介质中以微粒形式迁移,并且运移行为与气体成分无关;对流速度决定着铀微粒运移能力,同时迁移行为也受到孔隙介质和孔隙度等因素的影响。

类比童纯菡等人探究地气夹带元素受矿体本身影响的原理,核素迁移也受到周围通道介质的影响。邱腾^[36]结合土柱试验与铅锌矿中U迁移试验,建立介质通道内DPM模型,对U₃O₈在近场介质通道和远场介质通道的迁移进行研究。发现U₃O₈在近场介质通道迁移与流场中地气气流迁移大致相同,介质通道内的滞留程度与壁面粗糙程度、通道结构等有关;在远场介质通道中,矿体的深度、体积、浓度以及上覆介质的颗粒粒径、密度、孔隙尺寸等都影响铀迁移。李博^[37]将理论转化为实际也证实了相似的结论,在天然类比试验中发现,地气不但可以穿过致密围岩,而且可以携带核素迁移至地表,且迁移量随着矿体品位的不同而不同。

3 迁移模型

3.1 浅层地质迁移模型

元素迁移的理论基础由迁移机理、迁移后的赋存介质和形式、异常模式特征组成。元素迁移受到多种因素控制,元素浓度影响元素迁移速度,地貌特征反应元素富集和分散形式^[38],元素化学活性决定元素存在形式^[39]。因此元素自身的浓度、化学性质、化学活性以及地貌单元特征等差异都决定了元素迁移模型的不同。

3.1.1 离子扩散模型

一般来说,高浓度会向低浓度方向迁移,达到整个区域浓度均衡,当地下某区域中心的核素浓度高,而周围土体的核素浓度低,依靠浓度差的原理,高浓

度核素就会向低浓度扩散,形成连续的晕圈结构。在地表通过采样就可以获得与核污染垂直中心所对应的异常。

准确地描述污染物在多孔介质中的运移是土质监测和污染修复的必要条件,然而在离子扩散模型中,弥散度一直是一个争论不休的问题。弥散度通常被发现与空间规模和时间规模有关^[40]。弥散度对空间规模上的依赖性主要归因于土壤的天然多孔性或不同尺度下裂缝介质的非均质性^[41-43]。有学者认为是由于使用低维度模型来描述高维度系统的人为产物^[44]或使用扩散模型来表示扩散过程^[45];在时间上的依赖性是由于随机分析。根据随机理论,弥散度最初随时间增大,在经历了所有尺度的非均匀性后,最终达到渐近值趋于零^[46]。

在时间方面,PURKAYASTHA等^[47]提出了一维对流扩散方程,得到了随时间和边界条件变化的解。ARAL等^[48]将解扩展到任意时间离散性的二维无限域。在空间方面,GAO等^[49]得到的一维溶质在无限或半无限域内输运的解析解或半解析解。CHEN等^[50-51]开发了收敛流场中示踪输运的半解析解和在径向收敛流场、均匀流场中的溶质输运的二维解。然而这些研究大都是在多孔介质无限或半无限区域内,无论是国内还是国外都有很多报道,而关于有限域内核素扩散迁移的研究存在空白。

3.1.2 电化学迁移模型

由矿体周围自发产生氧化还原反应形成电位差,导致矿体上部边缘的阳离子浓度升高,随后阳离子沿浓度梯度扩散造成近地表传输异常。迁移模型中,矿体顶部周围有一个相对负的电位区,底部有一个相对正的电位区。在外部回流电流的作用下,由主岩孔隙水中溶解的离子提供回路,正离子向导体的顶部、负离子向导体的底部分别运动,构成外部移动电位形成“离子晕”,在土体表面呈现出对称分布的“双峰式”异常(如图1所示)^[52]。“双峰式”异常被认为是电化学迁移模型的机制。

电化学迁移模型是部分提取地球化学,通过化学定位来检测“离子晕”所在地层的成分,即与矿石相关的元素通过主动运输在覆盖层内向上运动,并以不稳定的、易提取的形式出现^[53-54]。但是根据目前已有文献记载,发现“离子晕”的产生机制以及它们随时间发展的程度还不清楚。除普遍认同的电化学迁移产生“离子晕”的观点外,其他产生机制的观点也在不断被提出。康明等^[55]认为,在各种地质营力作用下,呈阳离子和阴离子态的金属离子迁移至

近地表松散层中,被有机质土和其他黏土矿物吸附而富集,从而呈现出“离子晕”;孙彬彬等^[56]比对通电与不通电条件下地电化学土壤静态吸附试验,推断出地电化学的提取过程对黏土矿物应具有选择性,且化学所取得的异常信息很大程度上是由在电场作用下迁移的极细粒黏土矿物引起;此外,活跃的成土过程还可能涉及与矿化无关的不稳定元素,这些元素也会被一同提取,从而造成数据混合,可能产生虚假异常。

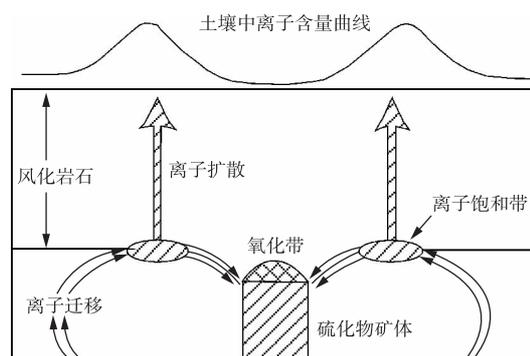


图1 “双峰式”异常模型^[52]

Fig. 1 “Bimodal” anomaly model^[52]

3.1.3 植物迁移模型

植物吸收土壤中的核素将其富集在根、茎、叶等器官中从而达到清洁土壤的目的。国内外针对其富集机理进行了大量的研究,发现植物根部与土壤之间可以发生物质交换作用来实现对铀的吸收、转运^[57]。植物根系分泌有机酸改变土壤的pH,活化土壤中的污染物,从而促进土壤中污染物的吸收^[58];其细胞壁含有丰富的纤维素和木质素大分子,并含有羟基、氨基等配位基团,它们能与铀离子结合,在细胞壁上沉淀下来^[59-60]。吸收过程如图2所示。核素形态、浓度、土壤含水量、有机质种类、pH、温度等影响着植物的富集^[61]。

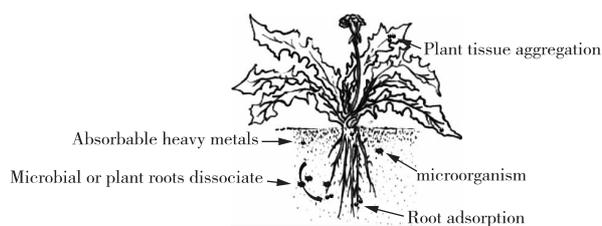


图2 植物吸收机制模型^[57]

Fig. 2 Model of plant absorption mechanism^[57]

植物修复是减少污染改善区域环境的一个有吸引力的选择,但它也面临一些弊端。例如超积累植

物生物量低、积聚能力受环境影响、后续植株处理工作等。面对这些问题,我们可以采用非超富集植物、螯合物等辅助植物释放化学信息,加强植物的修复性能,以实现大规模去除有毒物质^[62]。此外,基因工程也可以应用到植物修复中,通过在植物中引入新型的生物清除剂来提高所选植物的提取能力,也将有助于从植物中提取核素。对于植株的后续处理,我们可以采用热解法,减少有毒物质在热解后产物中的释放。尚鹏鹏等^[63]通过对热解温度、热解时间、升温速率、反应气氛以及添加剂等因素对重金属迁移转化特性的研究发现,在适当的条件下重金属以稳定形态富集到热解炭中,不会造成二次环境污染。

3.2 深层地质迁移模型

核素从地下几百至上千米的矿源中心迁移至地表,仅仅依靠水流或者浓度差是远远达不到的,因此浅层地表的迁移模型并不完全适用于深地质。从1980年开始,随着理论科学和现代技术的相互融合,适用于深层覆盖区矿场勘查技术的方法飞速发展,诞生了地气流迁移模型、改进地气法迁移模型、多营力接力迁移模型等多种迁移模型。

3.2.1 地气流迁移模型

气流迁移模型是指深层元素在上升气体的携带下穿过岩层、土壤层最终达到地表。上升气体是载气和稀有气体的混合物,它们来自不同深度的底层土壤^[64]。因在覆盖层内具有较高的运输迁移率,土壤气体成为核素迁移的一个潜在机制。地气流迁移模型从20世纪90年代末就在不断的发展。MALMQVIST等^[65]引入一个与微气泡形成深度成一定比例关系的深度参数,在地气勘探中测得了许多可以揭示基岩组成信息的元素,并使用PIXE技术研究地气测量机理。KLUSMAN等^[66]利用数值计算模型与实验测量研究了非饱和空间内土壤痕量气体和固体粒子的输运机理及气体浓度分布,该计算模型可以对扩散迁移进行建模。气流模型的建立

不仅可以从气流的角度建立,也可以从被迁移元素的形式建立改进地气迁移模型。

气体的输运取决于扩散、平流和浮力三种输运机制和它所通过的介质^[67]。在自然环境中,三种迁移机制不单独起作用,响应不同的自然环境而具有不同的强度(如图3所示)。气体扩散试验表明,气体将沿着阻力最小的路径快速扩散,大气泵机制辅助扩散。然而,气体在不同环境中的传输性质、气体作用下核素在覆盖层内的扩散程度等问题仍然不清楚。在许多情况下,由于物理和化学过程造成的岩石不均匀性,介质孔隙度对物质输运和地表气体异常程度产生显著影响^[68]。因此,传输通道材料的性质和厚度以及孔隙之间的连接对气体迁移仍然至关重要。

3.2.2 多营力接力迁移模型

元素在沉积物覆盖层中的迁移是一个缓慢而复杂的过程,其机制尚不完全清楚,特别是对于外来体覆盖层或厚厚的层序矿岩石和风化层而言。一般认为,微量元素从矿体运移到地表是通过一种或多种机制进行的。运移机制包括离子扩散、地下水迁移、电场迁移、气体运移、毛细管作用、生物过程和植物吸收等。这种多种机制运移被称为多营力接力迁移(如图4所示)。

ETIOPE等^[70]认为,裂缝性岩石中物质的运移是气体和水环境相互作用结果。运移的主要机制可能是压力驱动或密度驱动饱和裂缝连续气相驱替水;气泡含水层和饱和裂缝中气泡的浮力运动。刘映东等^[71]在探究铜镍硫化物矿床成矿元素时发现,金属离子、金属络合物、金属纳米微粒通过化学迁移、地下水搬运、地气携带、蒸发作用等多营力复合作用由矿体接力迁移至地表。RAVI等^[67]利用土壤部分提取和气体分析等敏感技术,将不同的机制与所运输覆盖物的性质以及气候环境结合起来,对运输覆盖物向上转移过程中与矿石有关的特殊机制进行探究。

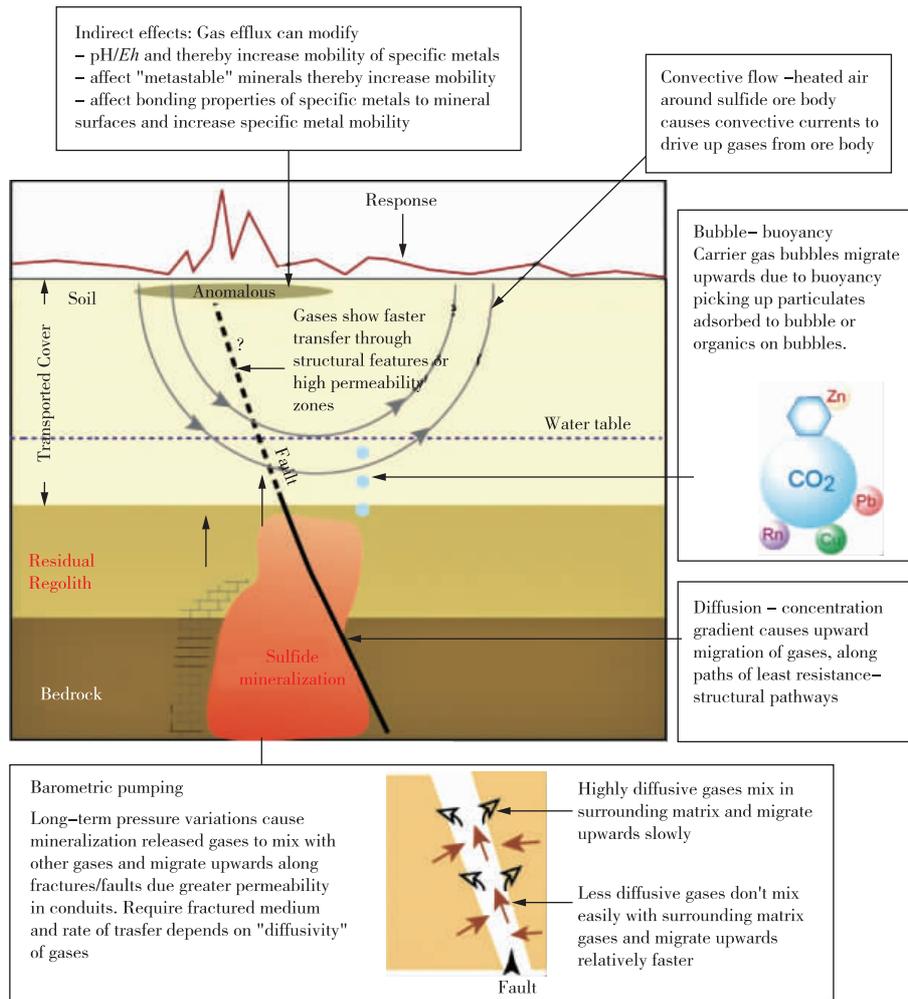


图3 气体迁移机制模型^[67]
Fig. 3 Model of gas migration mechanism^[67]

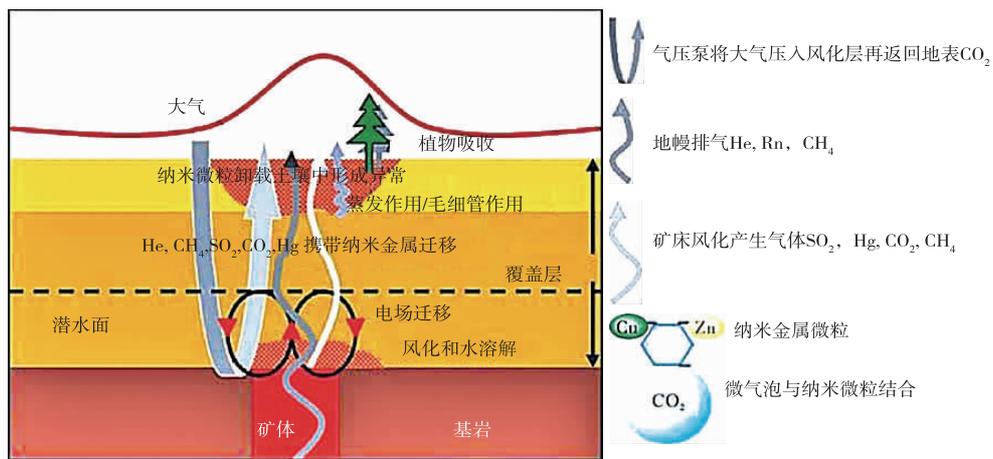


图4 多营力接力迁移模型^[69]
Fig. 4 Multi-force relay migration model^[69]

4 总结与展望

根据自然界中已有的规律,将核迁移进行了划分整合并对相应的机制进行阐述,发现这些机制或多或少都存在一些缺点,需要进一步的研究和完善。离子扩散模型和植物迁移模型是目前为止研究得最多、最透彻的模型之一。电化学迁移模型中天然形成的电源具有电荷量小、不稳定等特点,在原有基础上通过人为外加电源进一步增强了核素的迁移,为土壤中核素去除打下了坚实的基础。虽然目前为止地气迁移模型在隐伏矿探矿上应用居多,在其他方面的应用较少,但是相较于其他迁移模型,地气迁移具有低成本、应用范围广、环保等优势仍具有较大的研究空间,相信在不久的将来,地气迁移模型会广泛应用在核素迁移的探究中。

参考文献

- [1] 张彪,张晓文,李密,等. 铀尾矿污染特征及综合治理技术研究进展[J]. 中国矿业,2015,24(4):58-62.
ZHANG B, ZHANG X W, LI M, et al. The characteristics and research progress of uranium tailing comprehensives treatments techniques [J]. China Mining Magazine,2015,24(4):58-62.
- [2] 萧黎黎,王芝芬,花榕,等. 放射性核素在地质材料中的迁移研究进展[J]. 环境科学与技术,2019,42(4):53-60.
XIAO L L, WANG Z F, HUA R, et al. Progress on the migration of key radionuclides in geological materials[J]. Environmental Science and Technology,2019,42(4):53-60.
- [3] 杨周白露,张望,吴闻东,等. 化学淋洗法对石煤矿山放射性-重金属复合污染土壤的修复效果研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(2):1-11.
YANG Z B L, ZHANG W, WU W D, et al. Study on remediation effect of radioactive - heavy metal contaminated soil in stone coal mines by chemical elution[J]. Coal Science and Technology,2021,49(2):1-11.
- [4] 刘期凤,刘宁,廖家莉,等. 放射性核素迁移研究的现状与进展[J]. 化学研究与应用,2006,18(5):465-471.
LIU Q F, LIU N, LIAO J L, et al. The situation and progress of nuclide migration studies [J]. Chemical Research and Application,2006,18(5):465-471.
- [5] 陈永贵,蔡叶青,叶为民,等. 处置库膨润土胶体吸附迁移性及核素共同迁移特性研究进展[J]. 岩土工程学报,2021,43(9):1-10.
CHEN Y G, CAI Y Q, YE W M, et al. Progresses in research on adsorption and migration properties of bentonite colloid and its co-migration with nuclide in repository [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(9):1-10.
- [6] 肖钧升. 地下水中核素在岩体破碎区迁移扩散特性分析[J]. 能源环境保护,2021,35(4):64-69.
XIAO J S. Analysis on nuclide migration characteristics in groundwater in the fractured zone [J]. Energy Environmental Protection,2021,35(4):64-69.
- [7] GRIGALIUNIENE D, POSKAS R, KILDA R, et al. Modeling radionuclide migration from activated metallic waste disposal in a generic geological repository in Lithuania [J/OL]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 370: 110885. DOI. 10. 1016/j. nucengdes. 2020. 110885.
- [8] WILSON P S, KNOBLES D P. New findings on ocean engineering from university of Washington summarized (Vector acoustic analysis of time-separated modal arrivals from explosive sound sources during the 2017 seabed characterization experiment) [J]. Journal of Engineering,2020,45(1):1-13.
- [9] FINN D P. Nuclear waste management activities in the pacific basin and regional cooperation on the nuclear fuel cycle [J]. Ocean Development and International Law,1983,13(2):213-246.
- [10] SAMARINA N S, MASHKIN A N, MARKOVA D V, et al. Application of dynamic cross-flow filtration for solving the technological problems of project breakthrough[J]. Atomic Energy,2020,127(4):228-236.
- [11] ROGERS K A. Fire in the hole: A review of national spent nuclear fuel disposal policy [J]. Progress in Nuclear Energy,2009,51(2):281-289
- [12] DOLLEY S. Proposed senate bill would revive Yucca mountain repository project[J]. Platts Nuclear Fuel, 2019,44(9):2-3.
- [13] KIM J W, BANG J H, CHO D K. Modeling the groundwater flow in the nearfield of the near-surface disposal system[J]. Journal of the Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology,2020,18(2):119-131.
- [14] 朱君,邓安嫦,石云峰,等. 不同喷淋强度对核素 Sr-90 在土壤中迁移的影响[J]. 土壤学报,2017,54(3):785-793.
ZHU J, DENG A C, SHI Y F, et al. Effects of different spraying intensities on migration of radionuclide Sr-90 in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (3): 785-793.
- [15] COUTELLOT F M, SEAMAN J C, BAKER M. Uranium (VI) adsorption and surface complexation

- modeling onto vadose sediments from the Savannah River Site [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(4):1-12.
- [16] COHEN G J V, BERNACHOT I, SU D, et al. Laboratory-scale experimental and modelling investigations of ^{222}Rn profiles in chemically heterogeneous LNAPL contaminated vadose zones [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 681(1):456-466.
- [17] 左自波,张璐璐,王建华. 降雨条件下非饱和土中污染物迁移的数值模拟[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(增刊1):1347-1352.
- ZUO Z B, ZHANG L L, WANG J H. Numerical simulation of contaminants transport in unsaturated soils under rainfall[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(S1):1347-1352.
- [18] ZHANG Y, ZHANG Y J, WANG X H, et al. A case study on the soil-water characteristics of the vadose zone and the migration of intermediate-level nuclides in a planned spent-fuel reprocessing plant site[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284(1):1066-1064.
- [19] 蒋文波,高柏,张海阳,等. 某铀矿区周边土壤 ^{238}U 和 ^{226}Ra 分布特征及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(4):1799-1805.
- JIANG W B, GAO B, ZHANG H Y, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of ^{238}U and ^{226}Ra in soils surrounding a uranium mining area[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(4):1799-1805.
- [20] REN Y M, BAO H L, WU Q, et al. The physical chemistry of uranium(V) immobilization on manganese oxides[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 391:122207. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.122207.
- [21] KORICHI S, BENSMAILI A. Sorption of uranium(V) on homoionic sodium smectite experimental study and surface complexation modeling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1):780-793.
- [22] 王文凤,陈功新,曾文淇,等. 不同酸度降水对某铀矿废石中铀钍核素释放迁移的影响[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2019(10):46-49.
- WANG W F, CHEN G X, ZENG W Q, et al. Effect of rainfall with different acidity on release and migration of uranium and thorium from uranium tailings [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2019(10):46-49.
- [23] 刘媛媛,魏强林,高柏,等. 放射性核素在不同介质中的迁移规律研究现状及进展[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2018(6):76-82.
- LIU Y Y, WEI Q L, GAO B, et al. Current status and progress on migration of radionuclides in different media[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2018(6):76-82.
- [24] CHEN C, ZHAO K, SHANG J Y, et al. Uranium(V) transport in saturated heterogeneous media: Influence of kaolinite and humic acid [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240(9):219-226.
- [25] HARGUINDEGUY S, CRANÇON P, GAUTIER M P, et al. Colloidal mobilization from soil and transport of uranium in (sub)-surface waters [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6):5294-5304.
- [26] 吴冰,周义朋,王廷健,等. 新疆某铀矿床酸法浸出试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(5):58-66.
- WU B, ZHOU Y P, WANG T J, et al. Study on acid leaching of a uranium deposit in Xinjiang [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(5):58-66.
- [27] 王廷健,孙占学,周义朋,等. 新疆某铀矿床碱法浸出元素迁移探究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(1):34-41.
- WANG T J, SUN Z X, ZHOU Y P, et al. Study on element migration of alkali leaching in a uranium deposit in Xinjiang[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(1):34-41.
- [28] 侯伟,杨球玉,王旭宏,等. 我国高放废物地质处置概念研究[J]. *工业建筑*, 2020, 50(9):1-7.
- HOU W, YANG Q Y, WANG X H, et al. Study of disposal concepts for high-level radioactive wastes in China[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(9):1-7.
- [29] TONG C H, LI J C, GE L Q, et al. Experimental observation of the nano-scale particles in geogas matters and its geological significance [J]. *Science China Earth Sciences*, 1998, 41(3):325-329.
- [30] 童纯茵. 元素迁移的模拟模型实验[J]. *核技术*, 2001, 24(6):449-455.
- TONG C H. Imitative model experiment for elements transportation[J]. *Nuclear Techniques*, 2001, 24(6):449-455.
- [31] 童纯茵,李巨初,葛良全,等. 地气物质纳米微粒的实验观测及其意义[J]. *中国科学:D辑*, 1998(2):153-156.
- TONG C H, LI J C, GE L Q, et al. Experimental observation of nano-particles of terrestrial gas and its significance [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 1998(2):153-156.
- [32] 周四春,刘晓辉,童纯茵,等. 地气测量技术及在隐伏矿找矿中的应用研究[J]. *地质学报*, 2014, 88(4):736-754.
- ZHOU S C, LIU X H, TONG C H, et al. Application research of geogas survey in prospecting concealed ore[J].

- Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4): 736-754.
- [33] 唐桢, 周四春, 曹勇. 地气物质迁移模型实验[J]. 中国矿业, 2013, 22(6): 106-109.
TANG Z, ZHOU S C, CAO Y, et al. The application of imitative model experiment for geogas transportation[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(6): 106-109.
- [34] 陈刚. 地气作用下地质处置核废物中核素迁移的实验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
CHEN G. The experimental study of radionuclide migration of nuclear for geological disposal waste under the action of geo-gas [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [35] 罗齐彬. 隐伏铀矿勘探中地气测量机理及其应用研究[D]. 上海: 东华理工大学, 2019.
LUO Q B. Research on mechanism and application of geogas measurement in concealed uranium deposit prospecting[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2019.
- [36] 邱腾. 地气作用下地质处置核废物中核素迁移模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
QIU T. The simulation study on the migration of nuclides in nuclear waste after geological disposal by geo-gas flow [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [37] 李博. 地气作用下地质处置核废物中核素迁移的行为研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
LI B. Study on the behavior of nuclide migration in geological disposal of nuclear waste under geo-gas action [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [38] XU G Z, LI N, SUN L, et al. The principle of geochemical anomaly delineation based on three dimensional geochemical exploration data method and its significance [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(4): 617-626.
- [39] WANG J F, ZHOU Z D, DENG B. The form of migration, mechanism of deposition and existence states of gold[J]. Mineralogy and Petrology, 1985(1): 68-75.
- [40] GELHAR L W, WELTY W, REHFELDT K R. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers[J]. Water Resources Research, 1992, 28(7): 1955-1974.
- [41] BARRY D A, SPOSITO G. Analytical solution of a convection-dispersion model with time-dependent transport coefficients[J]. Water Resources Research, 1989, 25(12): 2407-2416.
- [42] GAO G Y, ZHAN H B, FENG S Y, et al. A new mobile-immobile model for reactive solute transport with scale-dependent dispersion [J]. Water Resources Research, 2010, 46(8): W08533. 1-8533. 16.
- [43] PICKENS J F, GRISAK E. Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer [J]. Water Resources Research. 1981, 17(4): 1191-1211.
- [44] ZHOU L, SELIM H M. Scale-dependent dispersion in soils; An overview [J]. Advances in Agronomy, 2003, 80(1): 223-263.
- [45] HUANG G H, HUANG Q Z, ZHAN H B. Evidence of one-dimensional scale dependent fractional advection dispersion [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, 85(1/2): 53-71.
- [46] DAGAN G. Time-dependent macrodispersion for solute transport in anisotropic heterogeneous aquifers [J]. Water Resources Research, 1988, 24(9): 1491-1500.
- [47] PURKAYASTHA S, KUMAR B. Analytical solution of the one-dimensional contaminant transport equation in groundwater with time-varying boundary conditions [J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 26(1): 78-83.
- [48] ARAL M M, LIAO B. Analytical solutions for two-dimensional transport equation with time-dependent dispersion coefficients [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1996, 1(1): 20-32.
- [49] GAO G Y, ZHAN H B, FENG S Y, et al. A new mobile-immobile model for reactive solute transport with scale-dependent dispersion [J]. Water Resources Research, 2010, 46(8): 1-16.
- [50] CHEN J S. Two-dimensional power series solution for non-axisymmetrical transport in a radially convergent tracer test with scale-dependent dispersion [J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(3): 430-438.
- [51] CHEN J S, CHEN C S, CHEN C Y. Analysis of solute transport in a divergent flow tracer test with scale-dependent dispersion [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(5): 2526-2536.
- [52] 王学求. 深穿透地球化学迁移模型 [J]. 地质通报, 2005, 24(10): 18-22.
WANG X Q. Conceptual model of deep-penetrating geochemical migration [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(10): 892-896.
- [53] CAMERON E M, HAMILTON K. Finding deeply buried deposits using geochemistry [J]. Geochemistry Exploration Environment Analysis, 2004, 4: 7-32.
- [54] MANN A W, BIRRELL R D. Vertical ionic migration: Mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2005, 5: 201-210.

- [55] 康明,过磊.地电提取异常的形成[J].矿物岩石地球化学通报,2008,27(2):195-199.
KANG M, GUO L. The formation of halos chim[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(2):195-199.
- [56] 孙彬彬,张学君,刘占元,等.地电化学异常形成机理初探[J].物探与化探,2015,39(6):1183-1187.
SUN B B, ZHANG X J, LIU Z Y, et al. A preliminary study of the formation mechanism of the geoelectric chemistry anomaly[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6):1183-1187.
- [57] PAN C, CHEN J, WU K, et al. Heavy metal contaminated soil imitation biological treatment overview[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 301. 012113. DOI: 10.1088/1757-899X/301/0/012113.
- [58] GONG X, TIAN D Q. Study on the effect mechanism of Arbuscular Mycorrhiza on the absorption of heavy metal elements in soil by plants[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(5): 52064-52071.
- [59] NISHIZONO H, ICHIKAWA H, SUZUKI S, et al. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yoloensis*[J]. Plant and Soil, 1987, 101(1):15-20.
- [60] WEI K. Study on the mechanism and application of microbial - castor combined repairing copper contaminated soil[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [61] AN L Y, PAN Y H, WANG Z B, et al. Heavy metal absorption status of five plant species in monoculture and intercropping [J]. Plant Soil, 2011, 345(1): 237-245.
- [62] PATRA D K, PRADHAN C, PATRA H K. Toxic metal decontamination by phytoremediation approach: Concept, challenges, opportunities and future perspectives [J]. Environmental Technology and Innovation, 2020, 18: 100672. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100672.
- [63] 尚鹏鹏,盛奎川,刘蒋龙,等.修复植物热解过程中重金属迁移转化特性的研究进展[J].可再生能源,2020, 38(3):285-291.
SHANG P P, SHENG K C, LIU J L, et al. Research progress of heavy metal transformation and migration behavior during pyrolysis of phytoremediating plants[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(3):285-291.
- [64] CAO J J, HU X Y, JIANG Z T, et al. Simulation of adsorption of gold nanoparticles carried by gas ascending from the Earth's interior in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Geofluids, 2010, 10(3):438-446.
- [65] MALMQVIST L, KRISTIANSSON K, KRISTIANSSON P. Geogas prospecting: An ideal industrial application of PIXE [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1999, 150(1/2/3/4):484-490.
- [66] KLUSMAN R W. Transport of ultratrace reduced gases and particulate, near-surface oxidation, metal deposition and adsorption[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2009, 9(3):203-213.
- [67] RAVI R A, ASPANDIAR M F, NOBLE R R P. A review of metal transfer mechanisms through transported cover with emphasis on the vadose zone within the Australian regolith [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 73(3):394-416.
- [68] RUAN T J, HALE M, HOWARTH R J, et al. Numerical modelling experiments in vapour geochemistry II: Vapour dispersion patterns and exploration implications [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1985, 23(3):265-280.
- [69] 王学求,叶荣.纳米金属微粒发现——深穿透地球化学的微观证据[J].地球学报,2011,32(1):7-12.
WANG X Q, YE R. Findings of nanoscale metal particles: Evidence for deep-penetrating geochemistry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(1):7-12.
- [70] ETIOPE G, MARTINELLI G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere; An overview[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2002, 129(3): 185-204.
- [71] 刘映东,张必敏,罗先熔.地电化学在隐伏铜镍矿勘查中的应用及异常形成机理探讨[J].地质与勘探,2017, 53(4):694-703.
LIU Y D, ZHANG B M, LUO X R. Mechanism of geoelectrochemistry anomalies and application to prospecting of buried Cu-Ni deposit[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(4):694-703.