自来水中的未知数

放射性元素的监管

我们被辐射包围着；作为生存在地球上的生物，我们每天都暴露于一定数量的辐射。这些暴露中有些来自于放射性物质（放射性元素），这些物质在自然界地质和土壤形成过程中大量存在。有时，人类的一些行为（例如采矿、核能生产），会使这些自然存在的物质浓度升高或更容易被接触到，从而造成其暴露水平远远超过其在自然界中的含量。而另一些放射性元素则是人为产生的。

几乎所有美国居民所居住的土地都少量或大量含有一类或几类放射性元素。这些物质通常可进入自来水管道，导致人们在沐浴或其它接触水的情况下，经胃肠道、呼吸或皮肤暴露于该物质。

尽管放射性元素普遍存在，但是我们对这些物质的来源、分布、相关的健康风险以及消减措施的认识仍不足。而且我们认为，目前由美国环保署（EPA）制定的饮用水放射性元素标准并不足以保护人群的健康。EPA应当尽快查看这些标准，在未来两年内，弥补大量缺失的信息并进行详细调查，以确保调查尽可能完善。

研究滞后，莫衷一是

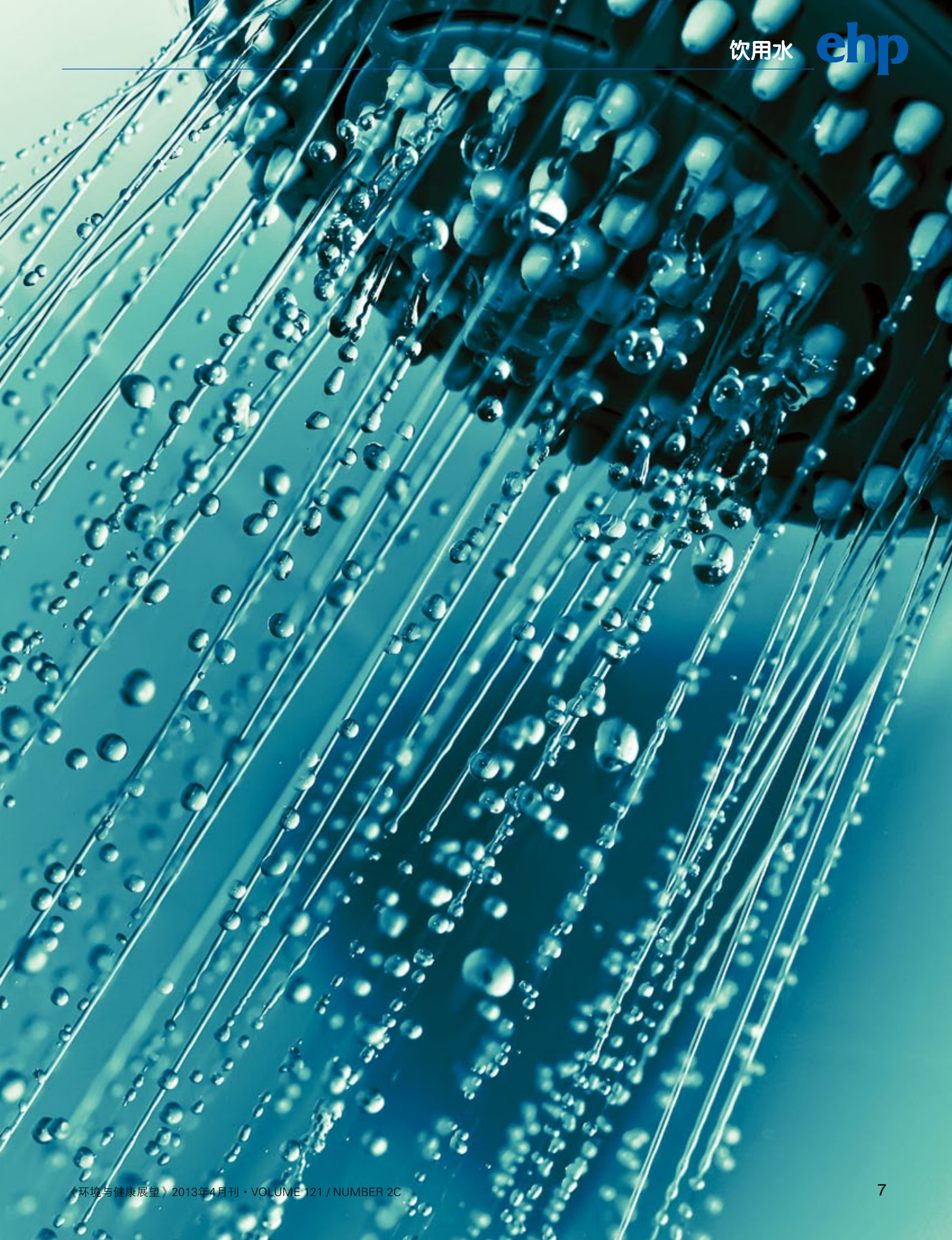
EPA最近一次对饮用水标准的审核是在2000年，当时EPA制定了铀的最高污染水平（maximum contaminant level, MCL），并再次肯定了其在1976年所制定的对镭-266和镭-228混合物、总α粒子放射活性以及β粒子/γ射线放射性的要求。法律规定，MCLs必须在健康风险和现有技术及成本条件中达到平衡。在2000年的规定中，EPA还将饮用水中放射性元素的最高污染水平目标（maximum contaminant level goals, MCLGs）定为零。MCLG指化学物在该浓度剂量无不良健康风险。

一位不愿透露姓名的EPA发言人称，该部门计划在2016年前完成这些标准的复审，以决定其是否需要修改、补充或修正。同时，EPA自1999年起一直推迟对饮用水氡含量标准制定的工作，尽管EPA已在2012年5月向国会发布了一份有关该项标准制定的报告。

据该发言人称，在下一次对放射性元素标准进行复审之前，EPA并没有实施任何特定研究的计划。因为该部门一直在进行标准评估工作——发言人称目前工作仅涉及了胃肠道吸收途径，并

© 2012 Mark Sayer/Shutterstock

除了沐浴或其它对水的接触，人们还可通过饮水或呼吸、皮肤途径，暴露于自然存在以及人为产生的放射性元素。



未涉及到经呼吸道吸入或皮肤接触途径——所以可将目前的阈值作为起点：铀为30 μg/L，镭-226和镭-228混合物为5 pCi/L，总α粒子放射活性为15 pCi/L，β粒子/γ射线放射性为4毫雷姆/年。

针对铀、镭、氚和α粒子等物质的标准、指导方针和健康目标，各国间存在很大差异。这些差异在世界卫生组织(WHO) 为各国所制定的饮用水中放射性元素调控指南中有所体现。这些差异还体现在一些国家对其各自标准采取更严格的政策上。比如，2009年，加拿大将铀的标准定为20 μg/L，而德国则采取了更低的标准定为10 μg/L。

所有放射性元素都是电离辐射的一个来源，且具有致癌性。美国地质调查局（U.S. Geological Survey, USGS）的一名水文学家Zoltan Szabo认为，就能造成较高且较难接受风险的接触水平而言，EPA所制定的阈值仅是一个合理的设想。“确实如此，有些更低检测浓度水平产生的效应可能还未明确，仍需要进一步的研究，”他说。“但已观察到的严重健康效应和高浓度暴露密切相关。”

Szabo补充道，尽管EPA提出了零暴露的目标，但这一目标似乎不可能实现，因此需要制定更为合理的阈值水平。例如，相较于美国EPA制定的MCLG，加利福尼亚州EPA已计算出了一个公共卫生目标——饮用水中铀的含量不超过0.5 ppb (μg/L) 。这一通过数学计算得到的目标值为我们提供了一个微量风险值以避免所有致癌和非致癌效应。

已有研究关注放射性元素的致癌作用，因为在大剂量暴露的个体中已稳定出现这一现象。然而，放射性元素可能造成的许多其它效应尚不清楚，而且美国和全球的现有标准并没有探求和提出这些问题，如多途径、多来源的累积性和长期效应（包括通过呼吸、胃肠和皮肤吸收来自饮水、食物、职业暴露、基线暴露和事故的污染）；多种放射性元素之间以及和其它化学物或微生物的交互作用；对存在潜在健康问题的人群的影响；以及对发育和内分泌、免疫及神经系统的影响。

但是，尽管在科学研究方面有严重滞后，自2000年以来的研究和综述表明，放射性元素的放射和化学毒性可能更严重，远超出EPA在制定饮用水标准时的预期。比如，WHO和美国国家研究委员会（U.S. National Research Council）总结得出致癌作用的线性无阈值模型同样适用于放射性元素；也就是说，有证据表明最低剂量的电离辐射也可升高癌症的风险。

在构建适当的保护规定时，一些专家认为我们应更关注儿童这一易感群体。“我们的整体（调控）方向是针对癌症和成年人，”位于马里兰州的一个倡导组织——能源和环境研究所 (Institute for Energy and Environmental Research) 主席Arjun Makhijani说道。“例如，我们根本没有考虑宫内暴露剂量。”

在制定饮用水标准时还需关注其它非致癌效应。约翰·霍普金斯大学Bloomberg公共卫生学院的环境卫生学和流行病学教授Ellen Silbergeld说，大多数放射性元素对全人群的潜在化学毒性信息仍存在很大缺失。“我觉得这是一个值得关注的问题，”她说。“许多（放射性元素）和金属相似，具有相当大的毒性。而这方面的研究并没有进行。”

12种放射性污染物质

在大量放射性元素中，由于以往的健康威胁、发生频率和其它的因素而备受研究者关注的物质有镅、铯-137、钴-60、碘-131/-129、铅-210、钚、钋、镭、氡、锶-90、氚和铀（列出了有放射性的同位素，未标明的说明所有同位素都有放射性）。除了气体氡和氚以及卤化碘之外，其它都是金属。其中，氡只存在于自然界中，而、铯-137、钴-60、钚-239和锶-90可完全由人工合成。其余的放射性元素既存在于自然界中也可由人造产生，尽管有些元素在自然界中的含量非常低。

Daniel Hirsch是总部位于加利福尼亚州的倡议组织——缩小差距委员会 (Committee to Bridge the Gap) 的主席，同时也是加利福尼亚州立大学圣克鲁斯分校核政策讲师，他指出，自然界中和人造的放射性元素之间的区别比开始认为的要复杂得多。他说，举个例子，如果有人在饮用水中发现了镭-226，这就是存在于自然界中放射性元素——也就是说，这并非人为从其它元素中创造出来——但是其浓度可能因为人类的行为而持续升高。“水中之所以会含有镭只是因为土壤中含有少量镭，这是一方面，”他说。“另一方面是因为尾矿堆的泄漏或镭加工设备的污染。”

可能导致放射性元素暴露的人类行为包括采矿、碾磨，以及放射性物质的加工过程；石油和天然气井的水力压裂排放的污水；核燃料、核武器、军用装甲、含磷肥料；以及某些医疗器械、烟雾探测器和塑料等物质的生产、使用、废弃和/或意外泄漏。

许多机构已采用了测定总α和β/γ放射性的方法，以替代个体放射性元素的测定。这些措施反映了确实存在可放射出这些粒子或射线的放射性元素，如钋-210、铯-137和锶-90。每种放射类型有其独特的效应和潜在的健康影响。α粒子主要由存在于自然界中的放射性元素发出，而β粒子和γ光子射线则主要由人造物质产生，尽管每种类别都有例外。

EPA的数据表明，大部分人类暴露都来源于自然存在的物质，包括氡气。大部分美国饮用水公用系统和个人用井，以及世界其它地方的水源供应中都存在可检测到浓度的放射性元素。

在有限的关于饮用水井中放射性元素的研究资料中，USGS发现，在其评估的未处理水样本中，有3%的样本镭水

最受关注的物质

放射性元素多达几百种，但是我们接触到的相对很少。人们放射性元素暴露的主要来源有自来水和食物、医源性和职业性暴露，偶尔来自于军事、能源、废弃物等类似的场所。以下列表中所罗列的元素不仅仅是一个单独的放射性元素，每种元素都存在若干个具有放射活性的同系物。

镅 是钚产品的一种副产物，通过核武器及能源的生产和使用，以及其它生产操作进入到环境中。它同时也被应用于工业水分密度仪、特定的烟雾探测器和医学诊断仪。可积聚在骨骼、肝脏及其它器官中，并可在体内蓄积长达几十年。

铯-137 这种常见金属的人造放射形式，其在人体内的传播形式和钾类似，能够渗透如多种类型的细胞中。其通常在几个月内就能被代谢。其多产生于核武器测试、事故、采矿和碾磨场所附近。

钴-60 是核反应堆生产的副产物，而且是反应堆废弃物非常重要的一种组成物质。其还被应用于多种工业和医疗器械。它大量聚集于骨骼、肝脏和肾脏内，并且被认为可显著增加患癌症的风险。这种金属还和生长发育密切相关，可能对免疫和心血管系统造成不良影响。相比于成人，其对儿童的威胁可能更大。

碘-131 大部分由人造产生，而碘-129则既可来自于自然界也可由人造产生。虽然具有放射活性的碘可引起健康问题，但它仍被应用于一些医疗器械。对其毒效应的关注大部分集中在其对甲状腺的损害或致癌风险上。儿童比成人更易受到侵害。可以通过短期使用某种特定的碘化合物来防止或减少对这两类同系物的摄入。

铅-210 是一种自然存在的放射性元素，来源于空气、土壤、岩石和水源。其化学毒性和稳定的铅元素相同，广泛认为极低剂量地摄入该物质即可产生大范围的不良影响。相比铅的稳定同位素，铅-210的含量相对较低，因此对此放射性元素的关注焦点在于其致癌作用。

钚 在自然界中的含量极少，大部分存在于饮用水中，这是由与核能及核武器、研究设备、废物排放点及事故相关的人类行为造成的。在19世纪50、60年代进行的核武器大气测定在世界范围内排放出了大量钚元素。其可迁移至骨骼、肝脏、肺或其它地方，且可停留几十年。它和免疫功能减低和肾脏损害密切相关。

钋 是一种具有高放射活性的致癌因子，但其作为一种饮用水污染并未受到广泛关注。然而，美国至少已有5个州（佛罗里达州、路易斯安娜州、马里兰州、内华达州和弗吉尼亚州）在饮用水中检测到了钋-210，有时其浓度在有限数据中呈较高水平。钋-210存在于自然界中或有核反应堆产生。其可蓄积在肝脏、肾脏、骨髓、脾脏、胃肠道和腺体内，已发现其可产生不良生殖效应。慢性摄入可导致提高消化道吸收，可能是由于α粒子放射引起肠壁损坏而引起的。

镭 广泛存在于水中，偶尔以灰尘或气溶胶的形式存在于大气中。和所有放射性元素一样，它可通过吸入（如淋浴时产生的水气等途径）、摄入或者经完整或受损的皮肤吸收进入人体。可在骨骼中蓄积数年，且在生长旺盛期大量聚积，从而对儿童产生更大的影响。除了具有致癌性和致突变性，它还可对生殖、发育、肝脏、肾脏和眼睛产生不良效应。磷矿开采和肥料产品提高镭及其子代化合物氡的浓度和暴露水平。

氡 是一种广泛存在于自然界中的气体，可溶于水，有时浓度很高，可通过淋浴和流水释放进入大气。在美国大部分地区，相比于其它来源的氡，如楼房地底下的土壤和岩石，空气中的氡只占室内氡浓度的一小部分，但在某些环境可能是应该关注的问题。氡的吸入是肺癌的主要病因，吸烟者的风险更高。而氡的摄入则可导致胃癌。

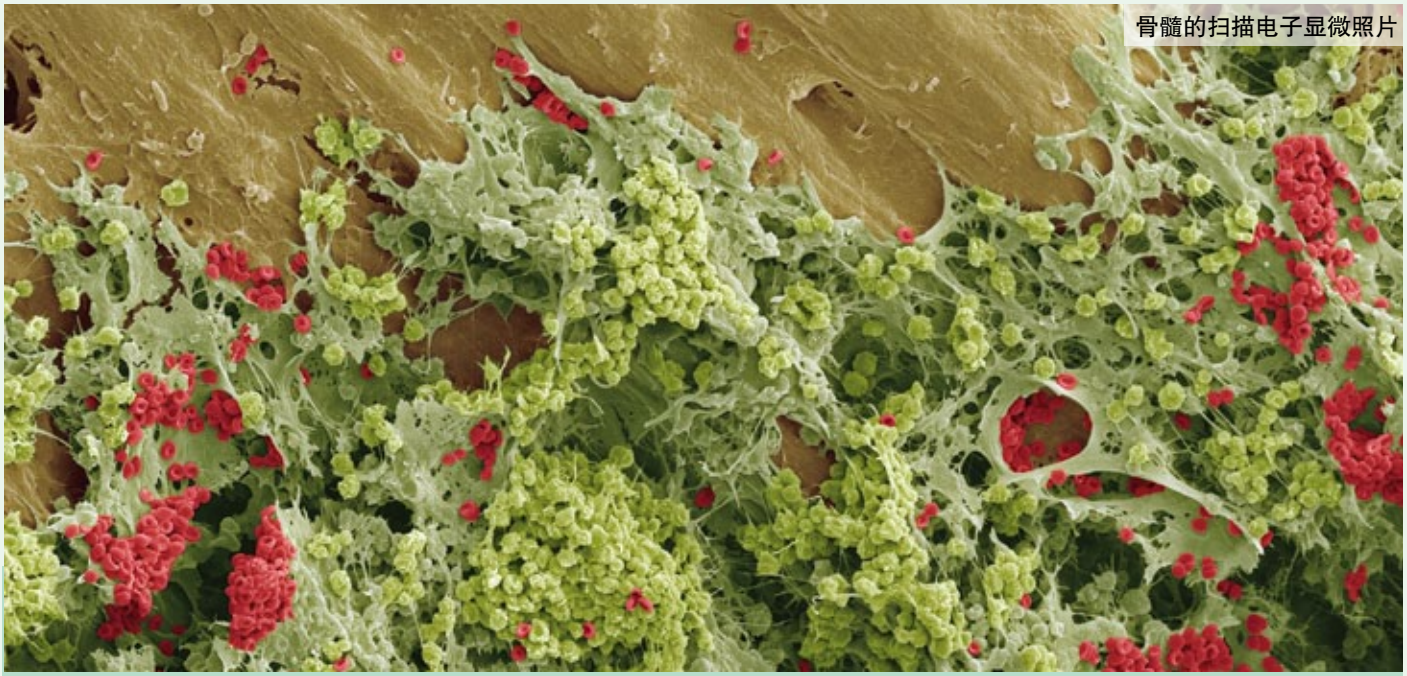
锶-90 广泛来源于核电站、武装设施、废弃站以及美国能源设备部门的排放。已发现其和骨骼损伤以及心血管和免疫系统的不良效应密切相关。儿童可能更易受到侵害，还有就是那些患有慢性肾脏疾病、糖尿病、风湿性关节炎或某些骨病的人，或者那些饮食中缺乏蛋白质或严重酗酒的人。

氚 作为氢的天然同位素，十分常见。人造氚主要来源于核武器及反应堆，但其也应用于某些电子部件和紧急出口指示牌。它可在几分钟内进入各种的器官、流体和组织，且需经数年才能完全排出体外。它对骨髓、生殖和发育都可产生不良影响。

铀 是一种放射性元素，已证实其具有化学毒效应；事实上，在2000年EPA发布的饮用水标准中已反映，其对肾脏的影响远大于其放射毒效应。人可以通过粉尘或气溶胶吸入或摄入铀。也可在不同程度上经破损或完整的皮肤吸收。采矿和水力压裂，或“压裂”，可使废水中铀（以及镭、氡、和钍）的浓度聚积。

在人体内，铀分布广泛，但相比于许多其它放射性元素，大部分铀可相对较快地被排泄。残留的物质最终可蓄积于肾脏、肝脏和骨骼中。其暴露和出生缺陷、某些基因型、发育和代谢损害，以及肾脏、肝脏和神经、内分泌、免疫、生殖及心血管系统的不良效应有关。

仍需进行更多的研究以证明这些结果在多大程度上代表了人类的真实暴露。比如，即使对于研究广泛的铀而言，美国毒物和疾病登记署仍承认对其所有可能的健康效应的信息非常少，特别是人类经口和皮肤的暴露。据美国疾病预防控制中心称，避免有害浓聚物接触是非常重要的，特别对铀而言，因为还没有得出有效的方法来减少慢性暴露所造成的人体负荷。


骨髓的扫描电子显微照片

有待探索的机制

因为许多放射性元素可长期在骨骼中蓄积，而骨髓在免疫系统功能中起着非常重要的作用，所以认为这些物质可导致免疫系统的损害。骨髓中一种关键的免疫系统成分是前B细胞，其具有高度的自身反应性。

至少已有两项研究显示对这些细胞的化学或辐射损害可导致自身免疫性疾病。有一项研究发现，慢性或急性铀暴露和自身免疫性甲状腺炎或睾丸炎密切相关。另一项研究发现贫化铀暴露可对免疫细胞和基因产生影响，这一影响对自身免疫性疾病的发生起着重要作用。

另一个有待探索的领域是毒物和传染病之间可能存在的交互作用。对此方面的初步研究表明，这些交互作用可能是十分重要的。例如，约翰·霍普金斯大学Bloomberg公共卫生学院的Ellen Silbergeld和她的同事们已观察到，当汞和疟疾或柯萨奇B3病毒联合作用时，可对人类的健康产生有利或有害影响。同样地，煤焦油暴露和休普乳头瘤（一种兔病原体）、吸烟和人乳头瘤病毒、以及黄曲霉毒素和乙型肝炎病毒之间也发现了相似的交互作用。

但是这方面的证据仍不足，表明了由此来推测放射性元素作用机制是否相似仍为时尚早。“进行归纳需要谨慎，”Silbergeld说道。“最重要的是，要推动人们进行更多的研究工作。”然而，她说，她对疟疾和汞暴露的研究“已卓有成效。”

另一个值得研究的生物学领域是肠道微生物学。已有结果表明肠道有机物和砷、双酚A、多环芳烃、2,2',4,4'-四溴联苯醚及一些药物等毒物之间可能存在交互作用。康奈尔大学微生物学副教授Anthony Hay称，他还未发现在放射性物质方面有其它类似研究。然而，他指出枸橼酸杆菌属是一种人体内普遍存在的细菌，已知其菌属中至少有一类可积聚铀。但是他说无法了解这种积聚作用可否在感染人群中导致铀毒性。“我只是提出这可证明某种原理，这并不意味着一定是这样，”他说道。

2011年12月，一支法国研究者团队在其发表于*EHP*的文章中写道，在普遍研究中仍缺乏对放射性元素潜在的毒性通路和机制方面的认知，因此需要进行更多此方面的研究。有关对饮用水暴露监测和生化分析适当方法的前瞻性实验对加强此领域的研究是非常重要的，同样确定更好的放射性元素诱导的健康效应的生物标志物也相当关键。

一项有助于此类研究的工具是美国疾病预防控制中心的生物监测项目。然而，现有的铀数据并不能分辨不同的同位素，发言人Jay Dempsey说道，因此无法确定每种物质的不同辐射效应。铯、钴和铅也同样缺乏其同位素信息，这些元素在追踪稳定和放射性同位素时通常会被考虑到。Dempsey称，他们并无计划追踪这些放射性同位素中的任何一种或添加任何放射性元素。

© 2012 Steve Gschmeissner / Photo Researchers, Inc.

平高于目前EPA的标准，有些地区甚至超标20%。镭超标的州包括阿肯色州、佛罗里达州、乔治亚州、爱荷华州、马萨诸塞州、新罕布什尔州、新泽西州和德克萨斯州。大约另有20个州也检测到镭，但其水平低于EPA标准。

另一项USGS研究显示，在抽样的井水样本中，大约有一半检测到了铀，且其中铀含量超过EPA规定的MCL占4%。铀超标的州包括亚利桑那州、加利福尼亚州、科罗拉多州、佛罗里达州、堪萨斯州、缅因州、内布拉斯加州、内华达州、新泽西州、新墨西哥州、北达科他州、德克萨斯州、犹他州和怀俄明州。

在第三项针对东北部地区的研究中，USGS也得到了大致相同的结果。在所有调查的家用和公用井中，有4%~17%的抽样井水中铀浓度超出了EPA标准，镭浓度超标率为3%~4%，总α放射性超标率为12%~16%，β放射性超标率为9%。康涅狄格州、缅因州、马萨诸塞州、新罕布什尔州、新泽西州、罗德岛和佛蒙特州都有一些井存在一项或多项指标超标。

美国疾病预防控制中心（CDC）生物监测项目组在92.5%受试人群的尿液中检测到铀。其所检测到的铀可能来自于各种来源，而不仅仅是自来水。

美国毒物和疾病登记署（Agency for Toxic Substances and Disease Registry）的发言人Jay Dempsey称，尿液中的水平相当低，且并未发现其与特定的不良健康效应间存在相关关系。“在人的一生中，我们都会通过饮水暴露于低剂量的放射性物质，这并不会引起不良健康效应，”他解释道。受到美国和全球关注的12种放射性元素现并未列入到生物监测中。

消费者的疑虑

几乎所有的市政供水都应当通过年度水质报告，即“消费者信心报告（Consumer Confidence Report, CCR）”，告知其用户在过去一年供水中所检测到的物质。各个州对该过程的管理略有不同；因此，有些市政供水中可能检测到了一定水平的放射性元素，但仅是偶尔或从不向用户报道。

除了铀和结合镭外，市政供水一般会在一开始对所有放射性元素进行筛查，检测总α和/或β/γ放射性。除非检测到的放射活性高于阈值，否则无需进行附加指标检测，这表明调控者（和消费者）无法确切了解到是何种物质引起了低水平的放射活性。正如WHO在其指南中解释道，“确定个体饮用水中的放射性元素是一个耗时且昂贵的过程。因为在大多数情况下，其浓度很低，所以这样详细的分析通常并不列入常规监测项目。”但是Hirsch称其为“非常糟糕的做法，”并补充道，“你们想了解的是特定的放射性元素，因为它们都有其各自不同的毒性。”

在其它情况下，市政供水水质对特定物质的测试是每隔5年或更久，而且只要求在测试那年对被检测的物质进行报告。在对市政供水水质进行测试时，只需要在每年的某一个取样点进行检测即可，其所提供的时点浓度即代表了全年的浓度水平，而实际上其浓度在一年中的变化相当大。EPA发言人说他们没有计划对CCR报告中这些方面的内容进行修改。

精确监测所面临的另一个挑战是，诸如镭、有时也包括锶-90这类物质，可附着于给排水管壁上，和水发生化学变化后被释放出来，爱荷华州立大学职业和环境卫生学教授R. William Field说道。所释放出的这类物质位于公用水源检测点的下游，因此无法捕捉到其最高峰值。另外，吸附了镭的管垢同时还是氡暴露的来源，这也无法被释放点检测捕捉到。

但当检测到的浓度水平高到足以引起关注时，就要采取诸如反渗透、离子交换、凝聚或石灰软化等方法对市政供水水质进行治理，这将花费几百万美金。相应治理方法的选择是基于需要减轻污染的程度、特定的放射性元素、水的化学性质、现有系统的特性和其它因素。

如果用户希望自来水中的放射性元素浓度更低，他们可以有自己的选择。比如在厨房水龙头上安装一个反渗透的过滤器，从而对人们引用的大部分水进行过滤，也可以选择让承包商为这套房屋安装反渗透系统。费用可以从几百到几万美金不等，这取决于使用的过滤装置的数量和类型。

随着研究的进行，*EHP*在2011年12月刊上发表的一篇评论指出，放射性元素暴露，特别是其在饮用水中的暴露，所产生的健康效应应该受到更多的关注，且应在此方面做更多研究。在其对所要解决的问题和解决方法的概述中，作者们建议可通过对饮用水进行彻底的生化分析和对其它潜在辐射源的数据收集，如饮食、吸烟、职业暴露以及来自氡或其它家庭来源的辐射，处理可能的混杂因素。

作者们认为，还需要改进评估持续时间、地点和内暴露效应的方法，包括识别最为特异、灵敏以及实用的生物标记物。至于其它类型的实验，在开始时就应调整研究人群（包括敏感亚人群）的构成，从而能提供充分的数据说服力。作者们指出，至今，该领域的大部分研究在暴露评估方面都存在局限性，这也使得暴露和健康效应之间的联系很难梳理。

Bob Weinhold，文学硕士，自1996年开始，为众多媒体采访报道了环境健康问题。他是环境记者学会的会员。

译自*EHP* 120(9):A350−A356 (2012)
翻译：张蕴晖

***本文参考文献请浏览英文原文**

原文链接

http://dx.doi.org/10.1289/ehp.120-a350