

对土壤重金属污染说“不”！

□ 文图 / 杨忠芳 刘斯文

民以食为天，食以粮为主，粮以土为生，土以岩为母。

人类与粮食、粮食与土壤、土壤与岩石之间，有着环环相扣、斩割不断的联系。一环脱节，便影响到整个链条的运转。然而，当前我国粮食安全生产正面临着巨大的压力。习近平总书记提出：“保障国家粮食安全的根本在耕地，耕地是粮食安全的命根子”，“耕地红线要严防死守、调动和保护好两个积极性，保障农产品供给，既要保数量，更要重质量”，凸显了国家对粮食安全的忧患意识。

事实上，土地资源绝对数量大、人均占有量少，优质耕地少、难以开发利用和质量不高的土地比例大，正是我国土地资源的现状，而城镇边界扩展迅速，土壤重金属污染趋势加剧，也是当今土地资源保护面临的严峻困难。污染土壤严重影响着我们的食物安全、人体健康，乃至生态安全，土壤污染修复是亟需解决的环境问题。

土壤污染 不容小觑

要了解土壤重金属污染，首先要“知其然”。科学上认定，凡是相对密度大于4.5克/立方厘米的金属元素统称为重金属，约有45种，如铜、铅、锌、铁、钴、镍、钒、铌、钽、钛、锰、镉、汞、钨、钼、金、银，等等。不同元素的化学性质不同，对人体健康影响也不一样，有些元素，如锰、铜、锌等重金属是生命活动所需要的微量元素，人体摄入量既不能多，也不能少；而有些重金属，如汞、铅、镉、砷、铬等并非是生命活动所必须，而且所有重金属超过一定浓度后都会对人体产生毒副作用。

目前，我国土壤环境质量标准（GB15618-1995）中只对砷、镉、铬、汞、铅、铜、镍、锌等有害重金属给出了环境质量限值，近年来，又在其修订版中新增加了锰、钴、硒、钒、铋、铊6个元素。然而，就普通民众来说，对于土壤重金属污染，



■ 杨忠芳

中国地质大学（北京）教授、博士生导师。长期以来从事环境地球化学、生态地球化学研究与教学工作。

仍是知之甚少。

从目前调查掌握的土壤有害重金属含量及空间分布看，我国土壤重金属污染具有以下特点：从土壤重金属污染面积看，污染范围由大到小的顺序是：镉 > 镍 > 砷 > 铜 > 汞 > 锌 > 铬 > 铅，从危害程度上，镉也是最严重的。无论是污染分布范围，还是超标程度，土壤重金属污染都是南方

重于北方，73% 的污染地区集中在西南石灰岩发育区、两湖地区、成渝地区、珠三角及长三角等地。土壤重金属污染分布面积大、复合污染明显。由于受到地质背景、成土过程、气候条件与人类活动等多种作用叠加影响，部分地区土壤重金属污染面积很大，且镉、汞、铅、铬、砷等多种重金属同时存在，给土壤污染修复带来了极大难度。

来源多样 令人担忧

自然界中，无论是土壤、水体、大气，还是动植物体中，都含有重金属，即使在没有人活动的高寒山区、荒漠戈壁地区也是如此，不同地区，只是含量高低不同而已。随着经济建设的高速发展和城镇化进程的不断加快，在人类活动影响地区，土壤中重金属除了原本就存在的自然本底外，又叠加了大量的外源输入部分，使得重金属高含量异常分布区面积扩大了，超标幅度增加了。而土壤中重金属的来源可以简单分成地质过程内源和人为活动外源两部分。

地质过程内源又分为继承型和次生富集型两类。继承型是指母岩中镉、汞、铅等有害重金属含量本身就高，在后期的风化成土中，这些有害重金属继承了这一高含量特点。调查显示，我国土壤大面积的重金属高异常主要是由成土母岩引起的，这些成土母岩多是富含铜、铅、锌、砷、镉等有害元素的硫化物矿床、黑色岩系、煤系地层等地质体，以及含锰、铬、镍的基性岩，等等。因此成土母质不同，所形成的土壤中的化学成分就不同，如基性岩地区土壤中铁、锰、镁、钙含量高，矿质养分含量较丰富；酸性岩地区土壤中硅、钠、钾含量高，缺乏矿

质养分。我国华南地区土壤中钨、锡等元素高含量就是由华南地区富含钨、锡的各种地质体引起的。次生富集型是指成土母质中元素含量并不高，但是在母岩风化成土过程中，化学性质活跃的元素，如钾、钠、钙、镁等易进入水体流失，而化学性质不活跃的元素，如汞、铅、砷等有害元素在原地的风化残留物中反而富集了。最典型的是我国西南地区，在这些地区广泛分布着灰岩、白云岩等化学沉积岩风化形成的土壤，砷、镉、铅、汞、铬等有害元素含量远远高于母岩。这是因为在成土作用过程中，灰岩遇到二氧化碳和水，会产生碳酸氢钙，碳酸氢钙是溶于水的，尤其在酸雨沉降的地区，这种溶解的速度是很快的，灰岩中含量极少不能溶解的物质（也称酸不溶物质），如黏土矿物等残留在原地，而原来在灰岩中含量很少的汞、铅、砷等有害元素被黏土矿物吸附高度富集在风化产物中，造成了砷、镉、铅、汞、铬等有害元素次生富集。因此，贵州、云南、广西等工业相对不发达的西南地区反而是我国土壤砷、镉、铅、汞、铬等有害元素含量最高的地区之一。

目前，土壤重金属的人为活动外源主要是在土壤形成之后，由人类活动带入到土壤中的重金属，比如：采矿、工业废弃物堆放及扩散、污水灌溉、交通运输、农业生产，等等。人类活动中的采矿、冶金、电镀等工业排放是土壤最主要的人为源重金属输入途径。汽车尾气排放及轮胎磨损



矿山开采尾矿导致的土壤污染（来源于网络）

产生的大量含重金属的有害气体和粉尘的沉降是道路两侧土壤重金属的主要来源，这些重金属元素主要为铅、铜、锌，等等。煤和石油燃料在燃烧时，重金属随烟尘进入大气，通过干湿沉降进入土壤。目前，我国大多数地区，外源输入进入土壤有害元素的途径主要是大气干湿沉降，如土壤镉污染相对严重的湘江地区，镉的大气沉降输入年通量可占到总输入年通量的90%以上。此外，农业生产中复合肥的过量使用，尤其是磷肥，也能向土壤带入重金属。土壤中过量的人为活动源输入重金属往往能改变该地区原有的土壤物质平衡，形成土壤生态环境安全风险，甚至引起土壤和农作物重金属污染。

当然，在经济发达、人口密集地区，土壤重金属往往是多来源的。深层土壤重金属基本是自然作用形成的，表层土壤（0~30厘米）重金属高含量既有自然作用也有人为影响，如长三角地区、湘江与珠江两岸，土壤镉高含量，既有河水从上游汇水区带来的，也有人生产生活进入的。

寻根溯源 找到症结

土壤中有害重金属含量高，不一定有危害，含量低也不意味着就可以高枕无忧。土壤中有害重金属是否进入农作物中，是否会污染地下水，除了和土壤中重金属含量有关外，还与其他因素有关，如土壤酸碱度、

质地、有机质含量，以及农作物种类、作物品种、气候条件与耕作方式，等等。因此，在被土壤重金属污染的同一个地区，如果选择合适的农作物种植、采取科学的农事活动，在一定程度上是可以避免重金属危害的。

这就需要进行大量的调查研究工作。首先，要调查清楚我国土壤重金属含量及分布状况，查清土壤重金属的主要来源，因为来源不同，危害程度不同。如果土壤重金属高含量是由地质背景和成土过程引起的，这些重金属往往是在矿物晶格里，或被有机质、黏土矿物牢牢地吸附着，较少地进入到农作物中或污染地下水。如果土壤中重金属是人为活动加进去的，危害程度就高多了。作为国土资源大调查重要成果及全国土壤污染状况调查专项，全国多目标区域地球化学调查项目也已发现局部地区土壤污染严重。如在我国人为污染严重的长株潭地区和广西石灰岩分布地区，土壤中镉、铅总量近似，但能够被作物直接吸收的水溶态含量差异很大：长株潭地区镉、铅水溶态含量占总量的比例分别为45%和8%，污染最严重的区域晚稻镉的超标率可高达42%，而广西镉、铅水溶态含量占总量的比例分别只有15%和1%，污染严重地区水稻镉的超标率只有8%。因此，查清土壤中有害元素高含量的原因，对于安全利用土地资源来讲是一项最重要、最基础的工作。

其次，要研究影响土壤中重金属生物有效性的主要因素。因为土壤中重金属可以存在于矿物晶格中，可以被黏土矿物和有机质吸附，可以溶解于土壤溶液中，虽然存在形式有多种，但只有易溶于水和弱酸的那部分重金属能被直接被植物吸收。因此，这部分重金属与生物的关系最为密切，被定义为“土壤重金属生物有效态”。土壤重金属生物有效态含量才是反映重金属生物有效性的直接指标。在重金属生物有效态含量高的土壤中，即使土壤重金属总量不高，植物也可能会出现重金属含量超标现象。对于农田土壤，土壤重金属的生物有效性主要受重金属本身性质、土壤酸碱度、有机物含量及种类、黏土矿物含量、碳酸盐矿物含量、钙镁等主要阳离子含量等多种因素控制。

修复之路 任重道远

污染土壤修复是指利用物理、化学和生物的方法转移、吸收、降解和转化土壤中的污染物，使其浓度降低到可接受水平，或将有毒有害的污染物转化为无害的物质。针对不同的土壤类型和土壤用途，很多国家都做了大量的研究工作，如北欧国家在评价农业土地污染状态时，主要考虑的污染物是重金属和持久性有机污染物，主要来源为肥料、农药、污水污染等；评价城市土壤污染时，则重点考虑土壤中的重金属含量，从而采取有针对性的修复



上图为离子型稀土
矿山开采造成的环境现
状：裸露区域为花岗岩
风化壳，即稀土含矿层。
该部分是由于 20 世纪
70—90 年代的堆浸和池
浸工艺所造成的，开采
时植被被去除，含矿层
被运至山下的堆浸池，
这种开采被称为“搬山
运动”，最终导致的环
境问题表现为山体裸露、
水土流失严重，山下尾
矿渣堆积，有害物质通
过地表水向下游迁移。

手段。从治理效果来看，采取物理的、化学的、生物的等多种土壤修复技术，降低土壤中重金属生物有效性是目前土壤污染修复的基本原理。这些修复技术中比较成熟或应用较多的技术有：固化/稳定化技术、化学氧化/还原技术、异位热脱附技术、异位土壤洗脱技术、水泥窑协同处置技术、土壤植物修复技术、土壤阻隔填埋技术、生物堆技术，等等。

目前，国际上土壤污染修复已形成了产业化发展、公司运作的发展模式。加拿大、日本、美国、英国、比利时、荷兰、德国、瑞典等国都成立了实力很强的公司，这些公司具备了开展污染土壤调查识别、进行土壤修复的能力，并且已同中国开展了广泛的跨国合作。同时，国际上不少国家已将土壤污染修复以立法的形式确定了土壤污染调查和修复的框架和流程，如美国的“污染场地管

理与修复基金”即“超级基金”，填补了美国土壤污染防治的法律空白，并推动了美国土壤修复市场的发展；日本制定了《农用地土壤污染防治法》和《土壤污染对策法》，明确了污染土壤修复的责任，规定了明确污染调查与修复流程；荷兰建立了土壤可持续环境管理框架体系，完善了土壤环境管理的法律及相关标准，完成全国土壤污染调查并向社会公众开放土壤污染场地数据管理系统和土壤修复决策工具箱，为企业修复土壤提供技术支持。

与国外相比，我国的土壤环境污染修复技术研究起步较晚，其研发水平、应用经验与发达国家相比还存在相当大的差距。此外，还存在土壤污染防治与修复相关法规标准缺失、土壤污染防治与修复资金不明确、土壤环境保护的管理体制不完善、土壤环境保护的产业链尚未形成、土壤污染防

治与修复技术研发力量薄弱等一系列问题。正因如此，这给我们带来了极大的挑战与发展机遇。面对经济发展、城镇化进程带来的土壤环境质量下降的局面，地学工作者首先要摸清土壤家底、查清土壤重金属富集原因，对于自然因素引起的土壤重金属异常，采取相应措施进行科学调控，消除土壤重金属生物有效性的激活因素，保障土地资源的持续安全利用；对于人为活动造成的高风险污染土壤，首先要控制污染源，精确厘定需要修复的地块边界，科学制定修复目标，研制适应我国国情的污染土壤修复与合理利用的方法技术。

以我国南方离子型稀土矿污染土壤的修复为例。我国是世界稀土资源大国、生产大国，稀土储量约占世界总储量的23%。离子吸附型稀土矿广泛分布于我国江西、广东等南方省区，江西赣州拥有全国30%以上的离子型重稀土，被誉为中国的“稀土王国”。然而，相对于稀土采矿收益而言，离子型稀土开采付出了高昂的环境代价。

中国于20世纪70年代开始进行离子型稀土矿的开采，先后经历了池浸、堆浸和原地浸矿3种不同的工艺技术。池浸、堆浸剥离山体植被易造成植被破坏、水土流失，原地浸矿易造成稀土浸出液（硫酸铵）

泄漏，水体和土壤氮氮污染。另外，矿石中的铅、锌、氟等元素被活化，进入土壤。稀土采矿活动导致表层土壤中氮、硫等营养元素流失严重，土壤贫化，而重金属元素铅、镍在矿区表土中超标；土壤普遍酸化，“三氮”有害物质在土壤深部富集；水土流失严重，存在潜在生态风险。

基于此类问题，我国地学工作者研究认为，改善矿区土壤地球化学条件，通过植被修复控制水土流失，是解决目前稀土采矿导致的土壤环境问题的主要途径。主要采用地球化学工程技术和边坡治理技术（柔性结构）相结合的方法对污染土壤进行修复。

地球化学工程技术，是应用地球化学的原理，通过人工制造的某些地球化学作用或利用地球化学原理制造的产品实现环境污染治理与管理的途径、方法和技术。地球化学工程技术中常会应用非金属材料如沸石、凹凸棒土等作为污染土壤修复的材料。这些非金属材料

来源广泛，价格低廉，不会对环境造成二次污染，与传统物理、化学和生物技术相比，采用地球化学工程技术治理重金属污染，具有“廉价、高效、管理简单、无二次污染”的优点。稀土矿山污染土壤的修复分为四步。一是通过添加自然黏土矿物，调整土壤地球化学属性，同时，筛选修复植被。该项工作主要在实验室和修复场地的试验田中完成。二是调整修复场地的土壤地球化学属性，将调整后的好土壤装入生态袋中，利用柔性结构技术将生态袋固定在修复场地上，形成护坡，并在生态带上进行植被喷播，植被喷播类型组合采取草、灌木混合方案。三是利用地球化学技术阻断污染，改善土壤环境，并尝试种植耐酸的经济类林木。四是长期监测修复效果。地学工作者在稀土矿区污染土壤的修复实践证明，土壤修复有效地改善了局部土壤地球化学环境，防止了水土流失，降低了潜在生态风险的强度。同时在矿区土壤种植的喜酸经济



江西某稀土矿污染土壤修复示范区修复后的效果

林(果)木的试验已获得成功, 最终将使得废弃的稀土矿变为可利用的绿色资源, 并能为地方带来巨大的经济效益。目前该类技术已在江西部分稀土矿区的污染土壤修复示范区成功应用。

土壤是万物之源, 万物生长离不开大地的支撑和滋养, 土壤的健康质量直接影响动植物和人类健康。土壤一旦被污染, 通过其自净能力完全复原的周期长达千年。所以, 为了人类自身的健康, 也得持续加大对污染行为的监管和惩治力度。对于已经被污染土壤的治理不容懈怠, 要对症下药尽量修复补救。更要坚决切断污染源, 杜绝造成新的污染。唯有如此, 才能精心呵护好这片承载着中华民族繁衍生息、发展壮大的土地, 让山更绿、水更清、土更净。

(责任编辑 / 崔熙琳)

部分国家土壤污染修复政策

国外土壤修复的兴起、发展与环境事件以及国家有关土壤的立法相伴产生, 一些国家如日本、美国以及英国等, 都以立法的形式确定了对已被污染土壤的调查程序、修复技术。

日本 JAPAN

1877年, 日本栃木县发生了足尾铜矿山公害事件, 采矿废水、废气、废渣大量倾入环境, 使河流污染, 山林荒秃, 农田毁坏。1968年, 日本又发生了由慢性钼中毒引起的骨痛病事件, 农业用地的污染问题引起了社会各方的广泛重视。

日本是最早对土壤保护立法的国家, 建立起了一整套基于水质污染防治的土壤污染对策法律体系。1970年, 日本国会将“土壤污染”追加为《公害对策基本法》中的典型公害之一, 并制定《农用地土壤污染防治法》, 对农用地土壤污染问题进行管理。2002年又制定了主要规范城市用地土壤污染的《土壤污染对策法》。现有相关法规明确了污染土壤修复的责任, 规定了明确的污染调查与修复流程。

日本的土壤环境保护模式：

