

# 放射性污染修复技术的伦理挑战与应对

艾立梅<sup>1,2</sup>, 徐飞<sup>1\*</sup>

1. 中国科学技术大学科技哲学系, 合肥 230026

2. 西南科技大学国防科技学院, 绵阳 621010

**摘要** 核能利用所引发的放射性污染问题正逐渐凸显, 放射性污染的修复与治理是保护人类免受放射性污染源可能造成潜在危害的重要方法。修复的成功取决于新技术的不断参与以及融科学、知识生产和管理于一体的新治理方式的创新, 同时需要引入污染修复技术的伦理考量。以辐射防护的伦理基础为指引, 从意图、过程、结果3个方面分析了放射性污染修复技术的伦理问题, 倡导技术和社会的协同治理、拓宽补充专家知识体系、以科学技术综合发展的能力建设为导向, 应当成为放射性污染修复技术向可能、可行、可持续的负责任研究与创新(RRI)实践过渡的有效路径, 也是未来和平利用核能、实现可持续发展的必由之路。

**关键词** 放射性污染; 环境修复技术; 伦理挑战

20世纪初核技术诞生以来, 随着核武器的研发以及核能发电的应用, 人类逐步迈进原子能的崭新时代。核能给人类带来巨大利益的同时, 也产生了对人类健康和环境具有危害的放射性废物及污染。目前的放射性污染主要来源于核燃料的生产、使用和处置过程中的放射性落下灰, 以及含有放射性物质的工业废物和医疗废物<sup>[1]</sup>。随着核技术的应用, 受污染的场地也必须同步进行治理, 被污染的环境需要进行修复, 以最大程度降低核污染对人类及生态系统的风险。放射性污染的生态修复目

标, 受技术可行性以及未来场地用途和价值的限制<sup>[2]</sup>, 同时因其发展历史短、技术经验相对缺乏, 相关环境问题尚有大量严峻的科学、道德和社会问题亟待应对。随着放射性废物及污染日益成为影响核能可持续发展的关键问题, 要确立21世纪核能可持续发展的全球理念, 就需要开展对核技术利用与环境协同可持续发展的相关伦理问题研究, 以促进人类命运共同体的和谐发展, 妥善应对这一争议巨大的环境问题。

为此, 中国于2017年颁布了《核安全与放射性

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2022-01-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(YD21110002004); 国家自然科学基金面上项目(21677118)

作者简介: 艾立梅, 博士研究生, 研究方向为新兴技术伦理及治理、科学技术与社会, 电子信箱: ailimei@mail.ustc.edu.cn; 徐飞(通信作者), 教授, 研究方向为科技哲学与科学史、科学技术与社会, 电子信箱: xufei@ustc.edu.cn

引用格式: 艾立梅, 徐飞. 放射性污染修复技术的伦理挑战与应对[J]. 科技导报, 2022, 40(19): 117-128; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.

19.012

污染防治“十三五”规划及2025年远景目标》，明确提出：辐射环境质量保持良好、核安全、环境安全和公众健康始终得到有效保障是核安全与放射性污染防治工作的根本出发点<sup>[3]</sup>。2021年，由中共中央、国务院印发的《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》再次提出，要切实维护生态环境安全，积极稳妥推进放射性废物、伴生放射性废物处置，加强辐射污染防治，确保核与辐射安全<sup>[4]</sup>。这些举措作为国家安全顶层设计的重要组成部分，充分体现了以习近平同志为核心的党中央对人民群众切身利益和人类命运共同体的高度关切。在此背景下，探讨放射性污染修复技术的伦理挑战与应对就成为目前科技伦理治理研究的一个重要课题。

## 1 放射性污染修复技术及其发展

放射性污染(radioactive contamination)最初用来量化给定环境中放射性物质的存在和分布。鉴于放射性对人类的伤害，该术语逐渐被公众广泛解读为与辐射相关危险性的量度。国际原子能机构将“放射性修复”(radioactive remediation)一词定义为：通过对污染源头本身及对人类的辐射暴露途径采取行动，为减少区域现有污染的辐射照射而可能采取的任何措施<sup>[5]</sup>，是旨在为保护人类健康和环境免受辐射的潜在有害影响，从土壤、地下水、沉积物或地表水等环境介质中移除或减少放射性物质的一种环境补救行动<sup>[6]</sup>。由于放射性元素的衰变规律不受外界温度、压力、电磁场等的影响，生物、化学反应的参与也不能改变其衰变规律，因此修复并非完全消除污染本身。受放射性污染的场地包含铀矿及伴生放射性矿开发利用场地；核设施(核电厂、核燃料生产)排污、退役、事故污染场地；放射源泄露；放射性废物处置场地；核爆炸、军用核设备和贫铀武器使用造成的污染场地等。这些以废气、废液和固体废物形态出现的污染物都可能进入土壤，造成环境土壤的污染，使土壤放射性水平超过天然本底辐射值或超过最大允许水平，长半衰期和极毒、高毒性放射性核素，通过食物链危害人类和其他生物健康。

国际社会在早期并没有充分认识到这种污染造成的复杂情况，直至对切尔诺贝利事故后果的评估，显示出放射性污染环境修复治理的复杂性、危险性与困难度。2018年，在罗马召开的全球首次土壤污染研讨会上，发布的《土壤污染：隐藏的现实》报告指出：由于核武器大气层试验以及切尔诺贝利事件产生的放射性落下灰，几乎所有北半球的土壤中含有的放射性核素浓度都高于基准水平<sup>[7]</sup>。被放射性污染后的场址，随放射性核素衰变产生的 $\alpha$ 、 $\beta$ 及 $\gamma$ 射线能穿透活体组织产生外辐射损伤，人类通过摄取、吸入或吸收放射性核素在体内造成内辐射损伤，诱发癌症、白血病等躯体效应甚至还可引起后代的畸形、发育异常等遗传效应<sup>[8]</sup>。因此，必须高度重视对放射性污染环境的治理，推动控制或减少相关污染物的技术创新，限制污染物或者放射性核素释放到生物圈，减少人类集体辐射剂量，确保不再构成任何对人体健康产生不利影响的重大风险，在允许的限度内改变受污染场址的用途<sup>[9]</sup>。主要修复目标之一是防止放射性核素在环境中不受控制的迁移与扩散，将受放射性污染的土壤区域转化为对人类与环境相对安全的状态。

从技术特征看，放射性污染土壤修复技术分为物理修复、化学修复和生物修复等<sup>[10]</sup>。物理修复在放射性污染土壤治理中占有主要地位，它是一种有效的放射性污染土壤处理方法，通过清除土壤受污染表层，把受污染土通过深耕翻到下层，用外来干净土、沙或草皮覆盖，可以有效降低表面污染率。化学处理主要对放射性土壤中的核素吸附、分离处理方式的开发，包括电动力学法，淋洗去污法，原位固化法等，利用尽可能低的成本和原料，对放射性污染土壤进行有效修复和治理。生物修复主要是以植物的吸收能力或微生物的吸附能力为核心开发的一系列将土壤中核素吸收转化或直接固化的一种处理方式<sup>[11]</sup>。目前，生物修复方法主要以植物修复、微生物修复以及植物-微生物系统组合为主。植物修复是一种环境友好型修复方法，利用植物来提取、降解、遏制或固定土壤中存在的污染物<sup>[12]</sup>。微生物修复则是利用微生物的分解代谢能力对放射性核素进行生物转化、生物吸附和生物矿

化,具有修复放射性核素污染的潜力<sup>[13]</sup>。植物-微生物系统组合是利用土壤中的微生物强化植物修复功能,通过真菌-植物嵌合体,有效增强宿主植物对土壤的净化质量<sup>[14]</sup>。

从历史发展来看,放射性污染土壤修复技术的发展历程大致经历3个时期:20世纪40年代至80年代以前、20世纪80年代至21世纪初、21世纪以来<sup>[15]</sup>。在最初阶段,铀矿采冶、核武器生产、核武器试验、核武器的军事用途等一系列核活动,以及20世纪50至60年代冷战期间的军备竞赛等,都推迟了人类对放射性沉降物、污染性放射性同位素、放射病以及其他与摄入的放射性污染物有关的健康问题之间联系的理解,此一阶段人们对核技术进步和生产的考虑,远远大于对核活动环境影响的忧虑。因此对放射性污染环境修复的投入也很少,最早可以追溯到1957年美国在内华达核试验场址进行的去污演习试验<sup>[16]</sup>以及1958年广岛长崎去污重建,主要是通过铲除表面污染土壤,同时采用深耕法有效降低土壤中放射性残留。美国在1972—1980年对其核试验场太平洋马绍尔群岛埃内韦塔克环礁(Enewetak atoll of the Marshall Islands)进行的放射性污染清理修复,也主要采用物理修复去除来自不同岛屿的大量被放射性钚污染的土壤,将其与水泥混合固化并运往鲁尼特岛(Runit Island)将其沉积在仙人掌(Cactus)核试验坑中;对比基尼环礁则采用添加黏合剂、施用钾肥等修复技术降低放射性铯的浓度<sup>[17]</sup>。20世纪80年代,随美国三里岛核事故(1979年)、乌克兰切尔诺贝利核事故(1986年)发生,大面积的各种环境介质(包括土壤)被放射性核素污染,放射性核素沉降物在食物链中分布和影响的广泛研究表明,需要不同的去污方法用于减少受污染土壤的辐射照射。尤其是20世纪80年代中后期,以美国汉福德、洛斯阿拉莫斯等军事场所的清理,中国青海221核爆基地和铀矿采冶退役治理工作为代表的历史污染场址的修复展开,现场玻璃固化技术、电动力学法、利用植物修复重金属和放射性污染物的技术被应用于放射性污染土壤修复实践中。1980年美国西北太平洋国家实验室最早采用玻璃固化技术处理超铀放射性核素污染

土壤,试验显示玻化土块能有效保留污染土壤中的铬和铯。美国汉福德遗址采用化学淋洗法有效降低土壤中铯、钚、钴的含量。处理切尔诺贝利核电厂场址的清理工作包括采用物理修复法清除5~10 cm的高放射性土壤表层,添加石灰、注水抽取净化等化学方法改变土壤化学性质,种植向日葵等植物修复法来吸收、转化污染土壤中的放射性核素。实践表明,处理方法通常需要同时使用方能达到更优的去污及修复效果。21世纪以来在福岛第一核电站发生事故后,通常将清除放射性土壤作为污染区域的修复措施,根据可持续发展、资源综合利用的具体的治理需求,实际操作中采用了表土清除,深耕改土,悬土移除,植物修复及添加农业化学品等技术共同净化放射性污染土壤。

从应用角度看,放射性污染环境修复技术所涉及的物理和化学过程,无论是机械性质的(放射性核素清除、与土壤混合等)还是化学性质的(土壤石灰化、添加钾肥等),都已被充分证明其有效性,足以在世界各地类似的情况下进行建模和应用。物理修复法能够快速应对核应急及高浓度污染环境条件下放射性核素与生物圈隔离,操作简单可行,对周围环境干扰较少。化学修复法处理速度快且目标性强,因此在放射性污染土壤的治理中应用广泛。通常对于大范围高活度放射性污染的治理方式主要是以物理或化学修复法为代表,效率高、去污彻底,能有效地将污染物与生物圈隔绝。但大量的铲土会增加处理和处置成本,操作人员易遭受辐射,而化学处理法成本高,对土壤的结构破坏大以及产生二次污染,因此在实际应用中通常需要与其他修复技术结合使用,需要更进一步的研究。生物修复技术具有成本低廉,对土壤结构没有破坏性影响,且不易造成二次污染等特点,特别适用于放射性水平较低的大区域的处理<sup>[18]</sup>。总体上,生物修复是一种环境友好的修复方式,对放射性污染土壤的表土层和亚表层甚至更深层都可以净化修复。但生物修复在时效性方面作用缓慢,有毒代谢物积累在生物组织内部,可能通过昆虫和动物转移到食物链中。

修复受放射性污染的土壤成本高、周期长、技

术难度大,单一的修复方法难以满足实际需求,为受污染场地设计有效的修复补救方案和采用经济上可行的技术方法,对科学家和工程作业人员构成巨大挑战。可以看到,随着人们对放射性污染环境及问题的研究和认识不断深入,新兴技术与现有技术的结合越来越广泛,例如纳米技术与生物修复技术结合修复受污染场地开始受到关注<sup>[19]</sup>。尽管大多数需要大规模修复的场所是以前的事发地、不当处置场所、核武器试验场址等辐射遗产,但随着核设施的退役,由此引发的放射性遗留问题将会更加凸显,世界各国纷纷加快对核活动受污染环境问题的治理,目前对这方面的伦理评估还比较少。因此,从具体问题入手,以放射性土壤污染修复技术为例,审视放射性污染修复技术涉及到的伦理问题,探讨未来技术发展和应用中的伦理参与,正视核技术利用带来的辐射生态风险,寻求修复风险的最大化规避,应能充实这一研究领域。

## 2 放射性污染修复技术的伦理问题与挑战

放射性污染修复技术在本质上令人遗憾的特征,首先在于只有在环境退化或破坏的情况下,才能找到方向和意义<sup>[20]</sup>。放射性污染的修复不仅限于减少辐射剂量,还涉及恢复生态系统、增加公众的理解和支持、恢复消费者对产品的信心,以及确保受影响人口的生计问题等方面<sup>[21]</sup>。由于这种技术活动通常被定义为“善”而缺乏伦理的持续关注。但历史证明,任何涉及环境污染产生或处理的对策本身都将具有伦理意义和争议。放射性污染修复技术的范式从本质上来说是辐射防护,是一种建立在坚实的科学基础上的,保护人类免受辐射可能造成的潜在危害<sup>[6]</sup>,具有防患于未然与弥患于已然特征<sup>[22]</sup>。与此相关的技术活动将是一种道德判断:如何减少辐射照射以拯救生命和以何种代价做出选择<sup>[23]</sup>,主要挑战来自于在此过程中人类健康与环境之间的权衡。以下从意图、过程、结果3个层面,以现有辐射防护体系的核心伦理原则为基础,从有利与无伤害、安全与风险、公平与正义、责任与义

务、谨慎与畏葸、尊严与自主权6个方面探讨潜在的伦理问题<sup>[24]</sup>,以期有利于核污染修复技术进一步朝向“善治”的方向发展。

### 2.1 有利与无伤害

有利意味着促进和善行,无伤害意味着避免损害。保护人类免受辐射有害影响促进公共利益与福祉,这一行动本身是以善为出发点,但在衡量利益、危害和风险过程中带来挑战<sup>[25]</sup>。为消除对人类的辐射风险而采取的补救修复措施本身有时也可能破坏脆弱的生态系统。美国能源部对其核武器场地的修复经验表明,在某些放射性核素污染区域可能存在具有独特价值的生态系统,修复活动带来的人为干扰可能对拟修复场所造成额外的压力。例如土壤的去除和覆盖,挖掘处置土壤污染层的覆盖植物和表层土壤导致生物富集地的退化,致使最能承受压力的物种迁移,可能造成本地生态系统无法恢复或者恢复期延长。美国洛基弗拉茨前核武器工厂场址对铀污染土壤的修复活动造成的土壤扰动在风的助力下发生扩散,影响远离污染地地区的空气和水质<sup>[26]</sup>。因此总体上的生态破坏甚至可能会超过修复的风险。一旦只关注辐射风险,忽视修复风险可能带来的负面影响,就有可能带来“无伤害”原则的困境。修复的善行与无伤害必须紧密交织,以确保残余风险不得与保护提供的利益不相称,否则即使人类的行动有助于环境修复,也会产生新的风险和隐患<sup>[27]</sup>。

### 2.2 安全与风险

目前为止,人类还没有找到100%有效的补救技术,大多数修复技术即使解决了具体的污染问题,但留下的残余或二次污染物,会在别处或将来造成不可避免的负面环境影响。在目前的研究中,不同修复方案降低辐射风险的有效性是基于将辐射剂量降低到阈值水平以下的的能力,而这些材料的生产、使用和处置的环境足迹容易被忽略,有些甚至可能对自然生态系统造成持久和不可逆转的伤害。例如,物理修复技术通常被认为是有效的,但覆盖或者深耕只限制了目前污染物的扩散,污染物将移到更靠近地下水位的地方,并可能迁移到地下水中,同时由于无法保障该区域场址未来的完整

性,污染物有可能重新进入环境,从而对后代造成影响。而化学处理法无法确定合成化学品可能对环境产生的所有不利影响,例如淋洗剂存在再处理的问题,化学螯合剂也会带来二次污染。此外,添加某些用于刺激生物酶的工艺化学品对当地土壤或沉积物生态可能产生负面影响。即使是生物修复这种低影响技术,也可能形成比原污染物更有毒的中间体,例如氯化溶剂生物修复过程中的致癌氯乙烯<sup>[28]</sup>。

### 2.3 公平与正义

首先,就放射性特点而言,其污染具有大的时空分布、复杂的标量特征以及与其他物质的纠缠性和毒性,这些性质穿透了人类划定的所谓安全的边界,无法排除其边界之外的危害,这种有界的空间与无界的污染跨越时间和空间,具有渐进和累积的特性,引发的灾难性后果会在未来时间序列上缓慢展开,甚至影响未来几代人<sup>[28]</sup>。当在长寿命的放射性核素污染面前采取的补救及修复努力变为一种“慢性灾难”(slow disaster)时,就可能导致人类长期的恐惧和无助感<sup>[29]</sup>。与受放射性污染土壤有关的放射性核素包括放射性强、半衰期长的锕系核素(Actinides),如<sup>239</sup>Pu(半衰期为 $2.41 \times 10^4$ 年);次锕系核素(Minor Actinides),如<sup>237</sup>Np(半衰期为 $2.14 \times 10^6$ 年)、<sup>241</sup>Am(半衰期为 $7.4 \times 10^3$ 年)、<sup>247</sup>Cm(半衰期为 $1.67 \times 10^7$ 年),对人类生存与生态环境构成长期威胁<sup>[30]</sup>。治理行动至少需要几十年时间,甚至在考虑持续监控和其他相关管理活动时需要几代人或更长的时间。在修复过程中,行动对整个污染地区生态系统的影响都将是巨大的,将污染土壤留在限定地点、还是完全移除到其他位置,或者实施一种可能影响到其他生态系统的技术决策,几乎都需要伦理考虑<sup>[31]</sup>。国际放射防护委员在其81号出版物中建议:“未来的人类至少得到与当代人相同的保护水平”<sup>[32]</sup>,必须选择对后代有积极影响的技术决策。但很难预测修复屏障是否会失效,给后代造成损害。

其次,在环境修复中,污染土壤要么被控制或隔离,受影响地区与废物一起共存;要么污染物被转移到其他偏远地方,成为与己无关的问题,这种

以牺牲少数人的辐射剂量或者福利为代价,换取大多数人减少辐射剂量影响,有可能会对劣势地域成员产生影响<sup>[33]</sup>,还易造成受污染区域的污名化,可能破坏该地域相关行业(食品、农业等)发展,影响低收入人群、偏远地区的少数民族以及儿童的生活质量,甚至使已经处于不发达地区将越发承担不成比例的负担<sup>[34]</sup>。

因此修复行为如果只强调技术方法,有可能会忽视过去放射性污染存在的地域不公正,甚至把修复当做改进环境利益,可能会延续这种社会和环境的不公正。

### 2.4 责任与义务

当代人若生产和使用了核能和放射性材料,就有道德义务尽一切可能保护后代。1995年,国际原子能机构(IAEA)发布了放射性废物管理的九项原则,作为处理放射性废物的保护水平及其对后代影响的基础<sup>[35]</sup>。其中第5条原则规定:放射性废物的管理方式应不会给子孙后代带来过重的负担,不应把风险和负担问题转嫁给下一代。这其中不仅应该考虑避免把问题传给后代,而且不应该忽视后代可能的意见,不应该剥夺后代的决策自由。当代人选择放射性污染修复技术和方式,有责任不忽视必要的可持续性发展的技术研发,才能保证后代的技术选择不会受限。人类有责任不危害及保护自然,所有主动修复方案都是可取的,对环境和未来有利的义务必须与不造成损害的义务相互平衡,确保利益大于损害。鉴于放射性核素对生态环境造成的深远影响,对放射性污染土壤的修复净化、生态重建、改良用途,既有利于稳定生态系统,也是核技术安全健康可持续发展的环境保障。但在纠正人类错误行为所需的修复措施以及何时需要在保护环境方面进行干预仍然存在分歧,比如危害是否从感官、动物权利、对当代人以及后代的后果等方面进行评估,这种分歧会对人类需要面对的危害产生影响。美国洛基弗拉茨前核武器工厂的清理和修复工作将“野生动物避难所”作为清理的预期结束状态,使得更经济、快速修复清理工作得以进行,但这也引发从成本利益角度出发可能会掩盖环境退化责任的质疑<sup>[36]</sup>。当复杂而不可量化的风险出

现在技术的操作环境中时,就会对技术失败的责任和赔偿提出疑问:由地震、海啸、地下水和土壤中核素的迁移等带来的不可预见的影响,由此造成损害该由谁来承担责任?受损害的人们是否会得到赔偿?

当代人对未来的义务是复杂的,在考虑减少后代负担的同时,要确保子孙后代有机会与当代人享有对资源使用和安全决策的同等决断,这不单涉及安全和保护问题,还涉及知识和资源的传承。放射性污染土壤被当前人类视为需要处理的危险,也应被看做是后代可能希望利用的一种潜在资源<sup>[37]</sup>。如果在可控的环境情境下,使用不可逆转的修复措施,那么相当于行使最极端的形式抢占了后代对土地的未来使用权。这就意味着修复技术必须以“结束状态”为前提,而不仅仅是“最终用途”更有利于可持续修复。

## 2.5 谨慎与畏葸

谨慎是指在不确定情况下做出知情且深思熟虑决定的能力,同时也是根据我们的能力选择去做或不做的能力。放射性污染的根本问题在于,人类必须考虑其行动结果的时间框架太长,以至于不具备与之相匹配的分析工具<sup>[38]</sup>。基于辐射防护实践的正当性、防护的最优化、个人剂量限值的三大原则<sup>[39]</sup>。所有的修复技术都是为了取得污染地区污染控制及生态恢复的成功,从技术的角度讲,要在数百万年内确保技术的有效性是不现实的,失败在一定程度上一定会发生。况且修复的结果并不全在人类掌控之中,对人类减少辐射剂量的努力可能会产生对环境更具破坏力的后果,将人类驱逐出切尔诺贝利地区的修复策略甚至可能会优于辐射对该地区的危害<sup>[40]</sup>。

如果就辐射照射情景实施防护监督,提出排除和豁免标准等,就可能会在道德和价值观方面带来困境。一方面,土壤或沉积物中的放射性核素浓度的可接受性标准不合理,仅以辐射剂量控制到不切实际的低水平来增加公众保护有可能导致不必要的挖掘、运输或者其他方式的处置,既造成修复的成本增加,也可能造成野生动植物栖息地的退化、丧失,破坏生物多样性;日本在福岛事件中并未对

大量轻微污染土壤实现豁免,致使大约2800万t污染土壤仍处于堆积等待再利用状态<sup>[41]</sup>。另一方面,如果用于修复的生物、化学技术偏离了利大于弊的无伤害原则,主张从修复策略中获得经济利益为目的的技术研发,将存在恶意修复的可能<sup>[42]</sup>。

由此可见,科学上的不确定性不应成为人类逃避责任的理由。谨慎不代表零风险,也不应被视为“保守”或“畏葸”的同义词,无论风险大小,都需要根据可接受的情况确定保护水平,同时对辐射的长期影响保持警惕,融入价值理念与责任意识,将辐射风险控制在合理可达到的最低水平(ALARA)<sup>[43]</sup>。

## 2.6 尊严与自主权

尊重即尊重个人人权以及个人自由意志和决策能力,强调通过参与和赋予个人知情决定的权力来促进自主权。在日常生活中面临放射性危害的每个人都有个人自主权,有能力不被胁迫自由行动,以及知情同意(自愿接受或拒绝风险的权利),这将有利于增加个人控制自己处境的能力。欺骗和隐瞒与辐射接触的风险,是有违当代伦理观念的,大多数情况下,如果仅把知情同意当做遵守的手段,而不是对利益攸关者的福利关切,就会有碍于对风险沟通和理解,甚至有可能带来公众抵制行动。

首先,部分修复措施可能会增加职业照射剂量风险<sup>[33]</sup>,因为放射性辐射造成的疾病有很长的潜伏期,作业人员的风险有可能随着时间推移而增加,2011—2020年,参与福岛修复和反应堆报废相关作业的人员因辐射致癌等原因引起的工伤认定就达269起<sup>[44]</sup>,获得可能面临辐射风险的现场工作人员的知情权可能引起更复杂的同意权和责任问题。首先什么是充分的信息披露水平很难界定,如果要将国际放射防护委员会建议的关于处置、排放、生产、储存、使用或工作场所或社区的危险材料全部信息以及辐射危害和应采取的预防措施进行准确、及时、完整的披露显然是巨大的挑战。

其次,增加的风险可能通过高额的报酬或赔偿来证明伤害的合理性,这将引发这样的争议:这是否会迫使人们承担他们本可避免的风险?日本政

府为推动福岛县地区发展,从2021年夏季开始为搬到福岛核电站周边的家庭发放补贴,该措施在日本国内引发巨额赔偿是否值得用生命冒险的热议<sup>[45]</sup>。

再次,核工业大部分笼罩在秘密和公众排斥之中,其中包括恐惧心理、缺乏信息以及信任,公众通常难以参与到相关的技术研发和活动中来,尤其是近年来公众邻避效应(NIMBY)日益突出,源自对核能等存在未知技术风险的危险废物、有毒物质的恐惧以及对新的环境价值的看法。因此在去污方法、清理标准、处置地点及未来土地使用上,与公众进行互动并达成共识是巨大的障碍,这也意味着可能无法让利益攸关方参与项目进程。

综上所述,在修复环境损害的过程中,有许多重要的道德考量,在捕捉技术和道德动态的相互作用的场景时,有必要同步关注技术方案与应用中的伦理考量,尽最大可能为人类未来可持续发展积蓄力量,增进可持续发展的能力。

### 3 放射性污染修复技术伦理问题的应对策略

人类正在设法解决21世纪以来因早期技术设计架构和战略缺陷引起的一系列科学技术问题,对于放射性污染而言,这是人类与核能利用之间的“浮士德交易”<sup>[46]</sup>,鉴于放射性污染的性质和影响,修复和清理工作可能涉及相当复杂的决策过程,尤其涉及土壤修复的典型性、特异性地域特征和当地的生物物种多样性、污染物的来源性,仅仅将挑战视为技术问题是不够的。重视伦理的导向作用,系统的考虑道德和社会问题,包括对决策程序本身的道德判断,最终才可能使对策的选择更优化、更少争议。

近年来,与我国核技术应用产业蓬勃发展的态势相比,我国在核与辐射安全的伦理和社会问题研究上与西方核大国还有一定差距,在当前“确保安全的前提下积极有序发展核电”的大形势下,负责任的发展核能不应仅停留在核电和反应堆技术创新的层面,也要加强核与辐射安全能力的建设,提

升保障水平。结合国际社会在放射性污染修复领域的政策与战略经验,对我国确保核与辐射安全领域技术伦理治理尝试提出如下建议。

#### 3.1 加快放射性污染修复及治理的安全立法与规范

中国核科技与核工业发展目前正迎来继“两弹一星”后的第二个春天<sup>[47]</sup>,如何规避核能利用可能带来的环境风险也成为迫在眉睫的新任务。不断提高科学技术水平,保障核安全是发展的生命线,是核能发展过程中不容质疑的任务。积极制定和完善核安全法律法规,是保障能源安全、实现“双碳”目标的重要手段。

当前我国正处于发挥政府职能、落实总体国家安全观和核安全观、推进核安全治理体系和治理能力现代化建设、制定和完善相关安全管理条例的阶段,2003年我国制定颁布了《放射性污染防治法》为主体的放射性污染防治法体系,目前核安全与放射性污染防治“十四五”规划也正由国家核安全局展开征集编制建议。但与世界主要核大国核与辐射安全的规划与行动立法现状对比,我国现有的法律法规体系对放射性污染修复基本方针、责任主体、监测制度、治理策略和标准等方面仍有待完善与改进。例如,美国国土安全部(DHS)发布放射性扩散装置(RDD)和临时核装置(IND)事故后的保护和恢复规划指南,详细地确定从导致大面积污染的广泛放射性事件中优化后期恢复的过程和程序,强调促进后期恢复成功的关键要素是复原力(resilience)、社会(community)和利益攸关方(stakeholder engagement)的参与和有效的风险沟通。后期恢复的优化决策过程分解为包括评估影响、确定目标和选择,评估备选方案、制定战略并成功实施以及监测和评价在内的一系列行动<sup>[48]</sup>。美国国家辐射防护和测量委员会(NCRP)提出了8项建议,以加强对大面积污染的放射性或核事故的后期恢复,要求对超出常规清理经验的情况要求进行充分平衡的考虑。包括制定促进社区恢复力的国家战略;将后期恢复整合到计划中并确保已执行;采用管理非常规广域污染的优化模式;确保利益相关者的参与和授权是优化过程的基础;制定沟通计划,将其作为预防策略的组成部分;制定包括废物管理

政策在内的适应性和响应性政策;建立整合从过去事件中汲取教训的经验机制,以专门解决大面积污染的影响<sup>[49]</sup>。日本政府在福岛事故后相继发布以《应对东北太平洋沿岸地震相关的核电站事故所释放的放射性物质污染环境的特别措施法》为代表的50多项法律、法令、部门命令和指导文件,涉及灾后放射性污染治理的各个领域,对放射性污染土壤修复治理给出了去污法律导则、基准、措施和建议<sup>[50]</sup>。尽管我国至今未发生二级以上的核电安全事故,但更应借鉴他国经验与教训,未雨绸缪,在推动放射性污染修复技术创新的同时,加快构建相关法律和监管框架,确保环境与生态安全可控。

### 3.2 加强交叉学科、跨学科协同攻关

鼓励社会科学参与实验室实践,激励在核项目研究中会聚社会科学与人文视角。放射性污染修复技术不同于面向用户开发的技术,它更不容易让科学家在社会环境中进行反思和想象。在研发阶段,允许自然科学和人文科学研究者跨学科团队中工作,围绕价值观杠杆进行设计、测试,由领导者和开发人员进行倡导并帮助规范伦理讨论,鼓励科学家和工程师就设计研发中的重要价值观达成共识,引导技术研发进程,探索未来的不确定性,然后制定适应未来可能场景中的一个或多个的行动,以应对最坏情况下的技术决策。在此过程中,社会科学参与科学实验和实践可以为伦理关切提供有效的指导,在研发阶段促进科学家对相关伦理议题的参与和兴趣,并自发解决容易引发伦理争议的技术局限。具有强大领导能力、良好设计研发实践和价值观倡导的跨学科实验室能够通过营造有益的伦理反思语境建立公正和公平的研发系统,并在构建任何原型实验、设计决策之前,做出关键的、充满价值的决定。在这一阶段,发现并加强培养伦理对话的研发实践,可以帮助对技术伦理感兴趣的实验室人员更紧密地融入技术开发与伦理风险的冲突中。例如要使放射性生态圈隔离,必须使放射性废物具备“固有的安全性”<sup>[46]</sup>,从水泥、沥青、陶瓷、玻璃固化,到对自然界中天然含有放射性核素矿物(锆英石、烧绿石等)的早期现场观察和实验室测试,利用其持续稳定存在于自然界的特性固化铯系核

素<sup>[51]</sup>,这就是伦理指引下人类科学技术的不断探索和成功的实践。

### 3.3 加强利益攸关方的对话与参与

随着“伦理治理”理念引入科技创新领域,由政治权威实行的单向管理转向多元对话、协商互动,利用科学、技术、政治之间互惠共生的合作关系,促使利益攸关方参与到解决科技发展的社会和伦理议题中。辐射在公众的感知中与核灾难联系在一起,对辐射的厌恶和恐惧,使得核科学的公众教育变得异常重要,加强风险沟通不仅在于增强公众具体知识的提升,还涉及到有效的风险感知,媒体的作用不单是在报道放射性风险与后果,更应当在安全准则、应急计划与恢复过程中,帮助、指导和改善公众有效的应对反应,确保利益攸关方的参与和赋权。利益攸关方的参与于1999年首次在国际辐射防护委员会(ICRP)第82号出版物中提出:“许多持续照射的情况已整合到人类栖息地中,委员会期望的决策过程将包括有关利益攸关方的参与,而不仅仅是辐射防护专家。”<sup>[52]</sup>

公众参与决策也是修复进程中不可忽视的重要核心,一方面利用当地知识,了解技术实施的当地环境,帮助科学家提高潜在对策的可行性和社会接受方面的认知。对切尔诺贝利核泄漏后对坎布里亚郡山地牧羊场放射性污染案例的分析,就从一个侧面反映了科学家们忽视了农民具备的当地环境的熟悉程度、山羊的特点以及山羊养殖管理的有效和有用的专业知识,这些被科学傲慢论忽视的知识都带来失败的教训<sup>[53]</sup>;另一方面,利益攸关方的参与不但可以提高对决策的接受程度,也会影响对一项技术在当地实施的效果和评价。政府或当地监管部门有责任创造条件实施手段,与受污染区域组织和利益攸关方建立密切的关系和沟通机制,使受影响人口有效参与保护战略,增强公众在重大灾害应对中的自助能力,过去管理受污染地区的经验表明,这将促进受影响地区有效恢复,提高复原力<sup>[54]</sup>。利益相关者参与的核心原则是全面的沟通努力,这一努力必须包括透明度、包容性、共同问责制和有效性措施。利益相关者必须充分了解修复的目标和过程,在整个恢复过程中,应制定、调整和

改进详细的沟通计划,以提高对修复战略的效率和可接受性<sup>[55]</sup>。

### 3.4 积极参与全球治理

全球低碳、绿色可持续发展需要核能,世界各国已成为核能全球产业合作发展的供应链、产业链、合作链中的一环,成为共谋核能互利共赢的利益共同体、共享人类发展繁荣的命运共同体以及合作分享、共尽责任的核安全责任共同体,为深化核与辐射安全治理合作创造了契机。虽然目前有大量的国际建议、政策可用于修复被放射性物质残留污染的土地,但还缺乏关于放射性污染治理安全相关的强制约束性国际协议<sup>[6]</sup>。要建立一套国际安全制度来规范受污染地区保护的标准化和合规评估,就有赖于知识共同体的共同参与以及就相关的道德问题达成重叠共识。核与辐射安全是人类需要共同面临的问题与挑战,这是在人类核安全命运共同体之间建立能力的增量、迭代和持续的努力过程。我国民用核能起步较晚,更需要积极开展国际合作与交流,借鉴国际资源与信息应对各种技术发展的不确定性,加强有利于辐射生态环境的科技创新,推进生态保护与修复,打好污染防治攻坚战。正如习近平总书记在第三届世界顶尖科学家论坛上所希望的那样,要努力实现科学和技术领域的开放、包容和互利的国际合作,加强重大科学问题的研究,促进解决共同的科学技术问题,深化重大战略科学项目的合作<sup>[56]</sup>。只有不断加强各国之间的国际和区域间合作,才能开创全球核与辐射安全治理的新纪元。

### 3.5 将伦理责任内化于科研环境

要使修复技术为紧迫的放射性污染治理提供可持续的解决方案,修复的道德和伦理影响必须纳入研发进程,注重科学家与公众的结合<sup>[57]</sup>,鼓励并支持科学家、工程师、决策者和其他公众反思他们在技术中的作用,意识到自身作为参与者的角色定位和责任。2020年,我国成立了国家科技伦理委员会,推动形成系统完备、科学规范、运行协调的科技伦理治理体系,为进一步改善创新生态,提出科研创新的伦理需求,进一步明确了科技工作者的责任。

目前,我国新兴科技伦理治理研究仍相对滞后,对于核与辐射安全监管治理这样影响复杂深远、有可能造成不可逆转伤害的前沿科技问题,更需要践行伦理规范,坚守伦理底线,保障治理行动行稳致远,进而有为。尤其是核设施退役工程可能会成为未来20~40年的一项大规模商业活动,将对环境治理修复技术带来更多挑战,需要防范利益刺激下的技术滥用,确定治理目标必须小心谨慎,做出合乎理性的决策,尽最大努力降低核废物“遗产传承”的风险。此外,目前大多数清理和修复技术是采用侵入性方式进行的,因此科研人员应自觉遵守环境伦理的基本要求,尊重自然规律及其内在价值,遵循人与自然和谐共生,规范科研实践活动,通过开发更经济有效的原位技术(如屏障处理系统)进行创新,尽可能降低环境风险。

## 4 结论

核与辐射安全治理是一项复杂的系统工程,任务艰巨又具有长期性,放射性污染的性质和影响表明,治理过程可能涉及相当复杂的决策过程,面临长期治理与中期技术与社会的有效控制和监管,涉及到治理的成本、风险与利益如何在人类与环境之间公平的分配,可能会引发一系列与社会、技术、道德相关的伦理问题,决定了人类必须以负责任的态度开展研究和解决现实困难,关注技术创新及应用中的伦理考量。对放射性污染修复技术的反思并未完全描绘与此相关伦理困境的全貌,在理性、协调、并进的中国核安全观引领下,推进放射性污染防治,强化核与辐射安全监督体系和能力建设,必须与从事研发工作的科学共同体合作,培养专家和决策者对相关伦理问题和责任的职业敏感,构建应对技术和创新的不利和有利影响的能力,服务人类共同的社会福祉;尊重受影响利益攸关者的尊严,促进与公众及利益攸关方的交流参与,坚定对核安全的信心,共同努力才能促进技术的规范治理;必须在环境污染的科学,技术,经济,社会和法律方面协同发展并遵循环境伦理原则和规范,方能实现真正的核污染环境保护,为人类的生存与环境

发展做出积极的贡献。

### 参考文献(References)

- [1] 罗上庚. 放射性废物处理与处置[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 1-2.
- [2] Gochfeld M, Burger J, Friedlander B, et al. Approaches for assessing hazards and risks to workers and the public from contaminated land[J]. *Remediation Journal*, 2007, 18(1): 29-57.
- [3] 中华人民共和国国务院. 核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标[EB/OL]. (2017-03-23) [2020-12-21]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-03/23/content\\_5179622.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-03/23/content_5179622.htm).
- [4] 中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[EB/OL]. (2021-11-02)[2021-11-09]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-11/07/content\\_5649656.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-11/07/content_5649656.htm).
- [5] IAEA. IAEA safety glossary: Terminology used in nuclear, radiation, radioactive waste and transport safety (version 2.0)[M]. Vienna: IAEA, 2006.
- [6] González A J. International policies and strategies for the remediation of land contaminated by radioactive material residues[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, 119: 5-12.
- [7] Rodríguez-Eugenio N, McLaughlin M, Pennock D. Soil pollution: A hidden reality[R]. Rome: FAO, 2018.
- [8] Ghosh P. Radiation hazards[J]. *Technology Engineering Maths Science*, 2021, 3(3): 151-152.
- [9] Telesetsky A. Ecoscapes: The future of place-based ecological restoration laws[J]. *Vermont Journal of Environmental Law*, 2012, 14: 493-548.
- [10] 罗恺, 李洋, 陈海龙, 等. 土壤放射性污染源分析与修复技术[J]. *环境影响评价*, 2019, 41(1): 50-53.
- [11] 张敏, 郜春花, 李建华. 重金属污染土壤生物修复技术研究现状及发展方向[J]. *山西农业科学*, 2017(4): 674-676.
- [12] 曹少飞, 李建国, 韩宝华. 大面积低水平放射性污染土壤的植物修复研究现状[J]. *辐射防护通讯*, 2016(1): 18-22.
- [13] Akhtar K, Akhtar M W, Khalid A M. Removal and recovery of uranium from aqueous solutions by *Trichoderma harzianum*[J]. *Water Research*, 2007, 41(6): 1366-1378.
- [14] Boulois H D, Delvaux B, Declerck S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the root uptake and translocation of radiocaesium[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 134(3): 515-524.
- [15] 张琼, 王博, 王亮, 等. 切尔诺贝和福岛核事故后放射性土壤修复研究进展[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(5): 117-121.
- [16] 喻名德, 杨春才. 核试验场及其治理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 321.
- [17] Davisson M L, Hamilton T F, Tompson A F. Radioactive waste buried beneath Runit Dome on Enewetak Atoll, Marshall Islands[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2012, 49(3/4): 161-178.
- [18] 查忠勇, 王定娜, 冯孝杰. 生物修复放射性污染土壤的研究进展[J]. *化学研究与应用*, 2014, 2: 153-159.
- [19] Thakare M, Sarma H, Datar S. Understanding the holistic approach to plant-microbe remediation technologies for removing heavy metals and radionuclides from soil[J]. *Biotechnology*, 2021, 3: 85-95.
- [20] Almassi B. Ecological restorations as practices of moral repair[J]. *Ethics and the Environment*, 2017, 22(1): 19-40.
- [21] Oughton D, Forsberg E M, Bay I, et al. An ethical dimension to sustainable restoration and long-term management of contaminated areas[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, 74(1/3): 171-183.
- [22] 王福臣, 于振生, 朱润生. ICRP辐射防护体系——一种先进的哲学思想[J]. *中国辐射卫生*, 1994(4): 214-215.
- [23] Oughton D. Social and ethical issues in environmental remediation projects[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, 119: 21-25.
- [24] 国际放射防护委员会(ICRP)第138号出版物——《放射防护体系的伦理基础》[J]. *辐射防护*, 2018, 38(3): 211.
- [25] Cho K W, Cantone M C, Kurihara-Saio C, et al. Icrp publication 138: Ethical foundations of the system of radiological protection[J]. *Annals of the ICRP*, 2018, 47(1): 1-65.
- [26] Burger J. The effect on ecological systems of remediation to protect human health[J]. *American Journal of Public Health*, 2007, 97(9): 1572-1578.
- [27] Lochard J, First Thomas S. Tenforde topical lecture: The ethics of radiological protection[J]. *Health Physics*, 2016, 110(2): 201-210.
- [28] Hsemann Michael H. Can pollution problems be effectively solved by environmental science and technology? An analysis of critical limitations[J]. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 271-287.

- [29] Mitchell A. Thinking without the 'circle': Marine plastic and global ethics[J]. *Political Geography*, 2015, 47: 77-85.
- [30] Gray-Cosgrove C, Liboiron M, Lepawsky J. The challenges of temporality to depollution & remediation[J]. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, 2015, 8(1): 2-11.
- [31] Turner M, Rudin M, Cizdziel J, et al. Excess plutonium in soil near the Nevada Test Site, USA[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 125(2): 193-203.
- [32] 国际放射防护委员会. 用于长寿命放射性废物处置的辐射防护建议(国际放射防护委员会第81号出版物)[J]. *辐射防护*, 2001, 21(增刊): 1.
- [33] Oughton D, Bay-Larsen I, Voigt G. Social, ethical, environmental and economic aspects of remediation[J]. *Radioactivity in the Environment*, 2009, 14: 427-451.
- [34] Howard B J. The Strategy project: Decision tools to aid sustainable restoration and long-term management of contaminated agricultural ecosystems[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005, 8(3): 275-295.
- [35] IAEA. The principles of radioactive waste management [S]. IAEA Safety Series, 111-F, 1995.
- [36] Krupar Shiloh R. Alien still life: Distilling the toxic logics of the Rocky Flats National Wildlife Refuge[J]. *Environment and Planning D: Society and Space*, 2011, 29(2): 268-290.
- [37] Shrader-Frechette K. Ethical dilemmas and radioactive waste: A survey of the issues[J]. *Environmental Ethics*, 1991, 13(4): 327-343.
- [38] Hadjilambros C. Toward a rational policy for the management of high-level radioactive waste: Integrating science and ethics[J]. *Bulletin of Science Technology & Society*, 1999, 19(3): 179-189.
- [39] Kurihara C, Cho K, Toohey R E. Core ethical values of radiological protection applied to fukushima case: Reflecting common morality and cultural diversities[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2016, 36(4): 991-1003.
- [40] Oughton D. Protection of the environment from ionising radiation: Ethical issues[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, 66(1/2): 3-18.
- [41] Fumoto H. Exemption and clearance in waste disposal [J]. *Radioisotopes*, 2019, 68(11): 773-789.
- [42] Dixon R L, Gray J E, Archer B R, et al. Radiation protection standards: Their evolution from science to philosophy[J]. *Radiation protection dosimetry*, 2005, 115(1/4): 16-22.
- [43] 罗上庚, 张振涛, 张华. 核设施与辐射设施的退役[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 176.
- [44] 日本福岛核工伤认定达269起[EB/OL]. (2020-10-29)[2020-12-21]. <https://www.chinanews.com/gj/2020/10-29/9325852.shtml>.
- [45] 日本出台新政: 搬到福岛核电站附近 一家奖励12万人民币[EB/OL]. (2020-12-15)[2020-12-21]. <https://www.chinanews.com/gj/2020/10-29/9325852.shtml>.
- [46] 艾尔文·温伯格. 第一核纪元[M]. 吕应中译. 北京: 原子能出版社, 1996: 190.
- [47] 祝叶华. 用科技创新引领我国核事业发展——访中国核学会理事长王寿君[J]. *科技导报*, 2021, 39(10): 72-75.
- [48] Chen S Y. Decision making for late-phase recovery from nuclear or radiological incidents[J]. *Health Physics*, 2015, 108(2): 161-169.
- [49] Nisbet A F, Chen S Y. Decision making for late-phase recovery from nuclear or radiological incidents: New guidance from NCRP[J]. *Annals of the ICRP*, 2015: 162-171.
- [50] 赵小波. 日本灾后放射性废弃物处置法律制度研究——以《放射性物质污染应对特别措施法》为核心[J]. *上海政法学院学报(法治论丛)*, 2015, 30(1): 73-82.
- [51] 卢喜瑞, 舒小艳. 钷钆烧绿石固化体的 $\alpha$ 及重离子辐照效应[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 176.
- [52] ICRP. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure[J]. *Annals of the ICRP*, 1999, 29(1/2): 1.
- [53] Wynne B. Social identities and public uptake of science [J]. *Radioactivity in the Environment*, 2013, 19: 283-309.
- [54] Lochard J, Bogdevitch I, Gallego E, et al. ICRP Publication 111—Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency[J]. *Annals of the ICRP*, 2009, 39(3): 1-4.
- [55] NCRP. Decision making for late-phase recovery from major nuclear or radiological incidents[R]. Bethesda: NCRP, 2014.
- [56] 共谋合作: 中国开放为全球科学家“搭台”——第三届世界顶尖科学家论坛[J]. *科技智囊*, 2020(11): 5-10.
- [57] 沈向洋, 龚克, 乔杰, 等. 认识及应对新兴技术带来的伦理问题[J]. *科技导报*, 2021, 39(2): 35-41.

## Ethical challenges and countermeasures to repair technique of radioactive contamination

AI Limei<sup>1,2</sup>, XU Fei<sup>1\*</sup>

1. Department of Philosophy of Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. School of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

**Abstract** With the increasingly prominent problem of radioactive pollution caused by nuclear energy utilization, repair and treatment of radioactive pollution becomes an important method to protect human beings from potential harm caused by radioactive pollution sources. The success of remediation depends on continuous participation of new technologies and innovation of new governance methods integrating science, knowledge production and management. On the other hand, ethical considerations of pollution remediation technologies need to be introduced. Guided by the ethical basis of radiation protection, this paper analyzes the ethical issues of radioactive pollution remediation technology in terms of intention, process and result, so as to advocate the collaborative governance of technology and society and broaden the supplementary expert knowledge system. Guided by the capacity building of comprehensive development of science and technology, this paper presents an effective path for the transition of radioactive pollution remediation technology to the practice of possible, feasible and sustainable responsible research and innovation (RRI), which is also the only way for peaceful use of nuclear energy and sustainable development in the future.

**Keywords** radioactive contamination; environmental remediation technology; ethical challenges ●



(责任编辑 陈广仁)