农业环境科学学报 2007,26(2):407- 412

Journal of Agro-Environment Science

放射性核素污染土壤修复标准的若干问题

唐世荣 **1,3**, 商照荣 **2**, 宋正国 **1**, 陈永亨 **3**

（1.农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津 300191; 2. 国家环保总局核与辐射安全中心, 北京 100082; 3. 广州大学环境科学与工程学院 , 广东 广州 510006）

摘 要:随着我国核武器试爆基地逐步对外开放、铀矿勘探和采冶活动增加以及越来越多的铀矿退役, 放射性核素污染场地的治 理与修复问题已初露端倪。无论是用物理、化学、生物还是工程的方法修复放射性核素污染场地, 土壤修复标准或基准 的制定始终 是要解决的关键问题之一。虽然近年国际上有关放射性核素污染土壤修复的基础理论研究和应用研究进展很快,但放射性核素污 染土壤修复标准的建立相对滞后 , 有待达成统一认识。而在我国 , 基本上没有人开展过相应的专项研究。为推动我国有关放射性核 素污染土壤修复标准的建立, 本文对建立放射性核素污染土壤修复标准的必要性、放射性核素污染土壤修复标准的 内涵与分类 、国 外放射性核素 污染土壤修 复标准等进 行 了回顾与讨 论 , 首次提出放 射性核素污 染土壤修复 标准或基准 应包括三重 含义, 即 放 射性 核素污染土壤的剂量/比活度标准（第一层次）、放射性核素污染土壤的生物多样性标准（第二层次）和美学标准（第三层次）。 关键词: 放射性核素; 污染土壤; 修复标准; 内涵

中图分类号：X53 文献标识码:A 文章编号：1672- 2043（2007）02- 0407- 06

Some Issues Related to Cleanup Standar ds for Remediation of Radionuclide Contaminated Soils

TANGShi-rong**1,3**, SHANG Zhao-rong**2**, SONG Zheng-guo**1**, CHEN Yong-heng**3**

( 1. Centre for Research in Ecotoxicology and Environmental Remediation, Institute of Agro- environmental Protection, Ministry of Agriculture of China, Tianjin 300191, China; 2. Nuclear and Radiation Safety Centre, State Environmental Protection Administration, Beijing 100082, China; 3. Shool of Environmental Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract：With the openingof our nuclear test sites to the public, increasing uranium exploration and mining activities, as well as decommis­sioning of more and more uranium ore deposits, remediation and reclamation of radionuclide contaminated sites have become a problem that needs to be addressed in the future. No matter what methods (physical, chemical, biological or engineering) one uses for remediation of ra­dionuclide contaminated sites, establishment of soil cleanup standards or reference levels is one of the key issues that needs to be solved. Al­though progress related to theoretical and applied research on remediation of radionuclides contaminated soils has been made in recent years, the setup of soil cleanup standards is relatively stagnant with a lot of arguments among international colleagues. In China, basically there is no special research aimed at establishing soil standard in terms of remediation of radionuclide contaminated soils. The present paper discuss­es the necessities of establishing radionuclide cleanup standards, their context and classification, and reviews the existing cleanup standards set up abroad for remediation of radionuclide contaminated soils. It was proposed for the first time that cleanup standards for radionuclide contaminated soils have three layers of context, including dose- activity (layer 1), biodiversity(layer 2), and aesthetics(layer 3).

Keywor ds： radionuclide; contaminated soils; cleanup standards; context

放射性核素污染土壤修复标准是指放射性核素 污染土壤经过各种技术手段修复后被法规确立和认 可的残 留 量 , 是一 种对人 体健康 和生态 系 统不 构 成 威 胁的法规和技术可接受水平, 也称为“放射性核素污染 土壤行动标准（水平）”Radionuclide Soil Action Level）, 任何高于这一标准的污染土壤都需要实施修复。由于放 收稿日期 ： 2007- 02- 02 作者简介：唐世荣（1963—）, 男,博士, 农业部环境保护科研监测所研 究员,中国农业科学院一级岗位杰出人才,主要从事污染环 境的生态修复与化学修复研究工作。

E- mail： [tangshir@hotmail.com](mailto:tangshir@hotmail.com) 射性核素与重金属、有机污染物的环境地球化学和化学 性质差异较大,受放射性核素污染的土壤必须要有自己 一套不同于重金属和有机污染物的清洁标准, 用以表征 各放射性核素污染点或污染场地经过人为修复后的清 洁程度。另一方面, 随着人们对环境的重视程度越来越 高,环境保护的标准也要求越来越严格, 对建立相应清 洁标准的呼声也就越来越大。

相对重金属和有机污染土地的修复标准来说,放射 性核素污染土壤修复标准的研究要薄弱得多。尽管如 此, 国外仍有一些标准被推出来［1~4］。国内已有零星的

文献探讨重金属和有机污染物的土壤修复标准问 题[4~7], 对放射性核素污染土壤修复标准基本上无人涉 及。我国国家环保总局在参考国外相关资料的基础上 于 2000 年公布了一个“拟开放场址土壤中剩余放射 性可接受水平规定（暂行）”[8], 然而, 这一标准基本上 不是以放射性核素污染场地修复为目标而制定的。我 国科技部基础司在 2006 年“973”招标项目中 专门列 出了一个有关放射性核素污染环境生态安全评价与 生态修复的基础研究项目, 说明放射性核素污染的修 复标准问题不仅从国际合作的角度需要进行研究,国 内放射性核素污染场地的实地修复也离不开它。本文 在参阅国外大量研究资料的基础上,就建立放射性核 素污染土壤修复标准的必要性、放射性核素污染土壤 修复的内涵等问题提出自己的一些看法, 以期对这一 领域的研究起到抛砖引玉的作用。

1. 建立放射性核素污染土壤修复标准的必要 性

建立放射性核素污染土壤修复标准具有重要的 理论与实际意义。首先, 放射性核素污染土壤修复标 准的建立有助于调动有限的资源对污染土壤进行有 效修复。其次,放射性核素污染土壤修复标准是环境 管理工作者进行环境修复质量检查的衡量工具。如果 没有一个可接受的修复标准, 一味要求责任人将受污 染的土壤恢复到原始状态或背景状态是不现实的。只 有建立一套合适的修复标准后,我们才可以知道修复 过后的场地在成本投入方面是否合算、是否经济, 从 美学角度看是否符合大众的审美观。第三,它是从事 放射性核素污染土壤修复实地操作者的行动指南。最 后, 建立放射性核素污染土壤修复标准是放射性核素 污染土壤修复领域内面临的重要问题, 是国际合作和 环境管理工作者从事相关活动的需要,也是放射性核 素污染环境修复成功与否的一个判别标志。

1. 放射性核素污染土壤修复标准的内涵

由于放射性核素内照射和外照射对人类健康的 危害机理完全不同于重金属和有机污染物, 放射性核 素污染土壤修复标准的内涵也不同于重金属和有机 污染物, 两者在建立的理论与方法方面存在较大的差 异。放射性核素污染土壤修复标准的建立至少要考虑 两个重要问题。第一, 要考虑污染土壤中放射性核素 产生的辐照剂量对人体健康和环境的影响。长期暴露 于低水平放射性核素污染环境下不仅引起致癌效应 （ carcinogenic effects） 也可引起非致癌效应（ noncar- cinogenic effects）,如致突变作用（mutagenic）、致畸作 用 （ teratogenic） 和急性毒性效应（ acute toxicity effects） 等。人们在评价放射性核素污染场地暴露风险时往往 更多地关注放射性核素的致癌效应, 并将放射性核素 污染环境暴露引起的致癌风险作为评价放射性核素 污染场地健康风险的基础, 比较容易忽视长期暴露低 水平放射性核素污染环境引起的非致癌效应。第二, 不仅要考虑放射性核素在污染土壤中的绝对比活度, 还要考虑放射性核素对人类和环境尤其对非人类物 种产生的辐照剂量。因此, 传统意义上的放射性核素 污染土壤修复标准带有剂量与比活度双重色彩, 这也 是它与重金属和有机污染物污染土壤修复标准不同 之处。

与重金属污染土壤修复标准类似[6],放射性核素 污染土壤修复标准或基准至少包括三重含义, 即放射 性核素污染土壤的剂量/比活度标准 （第一层次）、放 射性核素污染土壤的生物多样性标准 （第二层次）和 美学标准（第三层次）。它们之间的关系如图 1 所示。 第一层次标准可看成是量化标准（客观标准）, 第三层 次的标准是非量化标准（主观标准）, 而第二层次标准 介于量化标准与非量化标准之间（ 客观标准与主观标 准之间）。目前普遍接受的标准是第一层次的量化标 准, 对第二层次和第三层次标准未做特殊要求。随着 环保条件日趋严格和人们对环境保护意识的强化, 第 二层次的量化标准和第三层次的非量化主观标准也 开始浮出水面, 成为管理工作者等用以衡量场地修复 成功与否的标尺。

* 1. 传统的放射性核素污染土壤的剂量/比活度标准

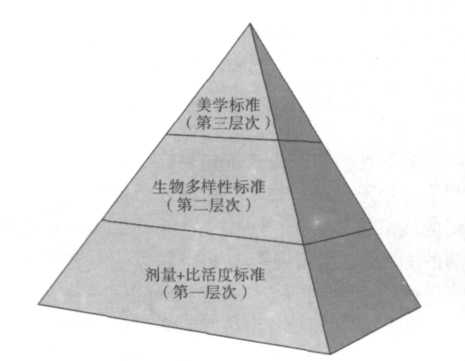


图1放射性核素污染土壤修复标准或基准的层次性

Figure 1 Layers of the context of cleanup standards or reference levels for radionuclide contaminated soils

放射性核素污染土壤的剂量/比活度标准是指拟 修复或修复完工后土壤中残留放射性核素的量及其 对人体产生相应的辐照剂量, 通常用以下单位表示: Bq・kg-1/mSv・a-1或pCi・g-1/mSv・a-1。剂量/比活度标准 是最常用的量化标准。某些情况下, 可单独使用比活 度标准（用Bq-kg-1或pCi-g-1等表示）或场地放射性 核素剂量标准（用mSva-1等表示）。美国环保局（EPA） 主张用一套连续的、现已存在的风险单位表示修复标 准，其表达形式为：#沁0#。这种表达方式更有利于阐 明放射性核素污染物的累积风险，也更符合EPA对 风险特征表征风格。

美国环保局［1］在其备忘录“环境应对、赔偿和责任 综合法管理的放射性核素污染场地清洁标准的建立” 中明确指出, 放射性核素污染场地应该用风险水平或 暴露剂量水平来表示, 避免仅用土壤中放射核素的绝 对比活度大小表示, 但强调对给定风险水平的各种介 质如土壤的放射性核素比活度进行测定。

* 1. 放射性核素污染土壤修复的生物多样性标准

放射性核素污染土壤修复的生物多样性标准是 指修复过后土壤中生物多样性的丰富程度, 可用各种 多样性指数（包括a多样性指数、B多样性指数和Y 多样性指数）表达修复竣工后土壤生物多样性的丰富 程度。a多样性指数用以测度群落内的物种多样性；B 多样性指数用以测度群落物种多样性沿着环境梯度 变化的速率或群落间的多样性；Y多样性指数则是一 定区域内总的物种多样性的度量［9］。

生物多样性是自然资源的重要组成部分, 放射性 核素污染土壤修复是否成功, 必须要从场地生物多样 性角度进行考察。修复工作者在制定和实施修复方案 时除考虑恢复土地使用价值外还应将生物多样性的 恢复或增加作为工作目标, 并对稀有物种栖息地和重 要的生境类型采取严格的保护措施。虽然人们已成功 地将生物多样性指数应用于水域环境的污染监测, 并 试图将生物多样性指数用于矿山复垦领域［10］。但目前 国际上对放射性核素污染区与土壤修复有关的生物 多样性保护、恢复等问题仍没有给予足够的重视。表 面上看, 放射性核素污染土壤修复采用生物多样性标 准脱离现实、有点空洞, 其实不然, 生物多样性指标是 非常有价值的指标, 加强这一领域的基础研究有助于 强化人们的生物多样性理念, 对开展植物品种选育、 种植等工作, 提高选择生物修复措施的准确性、科学 性和实用性具有一定的指导意义。

* 1. 放射性核素污染土壤修复的美学标准

污染土壤修复的美学标准,是指整个修复活动从 开始到竣工的全过程中应符合的美学原则与尺度。污 染土壤修复不同于其他的活动,它集方案设计、灌溉 与施肥、设施配置、品种选育与搭配等环节于一身,体 现生态美、环境美、人性美、科学美、技术美、生物多样 性丰富以及实用原则的统一。从生态美和环境美的角 度看,放射性核素污染环境的修复要以可持续发展理 论为指导, 把整个修复活动对环境的影响放在第一 位, 修复过后的场地要符合大众的审美观点；从人性 美的角度看,修复活动从方案设计开始就要以美的规 律为指导,体现“以人为本”的社会需求。也正是由于 这一原因, 才使人们在衡量放射性核素污染场地修复 是否成功时有意或无意地附加一定的美学需求； 从科 学美、技术美及实用原则的标准来看,修复活动要不 断优化实施方案, 选取既环保、节能又廉价、简单的实 用技术,给操作者和周围居民以美的享受。总之, 放射 性核素污染土壤的美学标准,更深层次地体现了以人 为本、构建和谐社会的时代特征。由于不同地域、不同 民族、不同年龄、不同阶层的居民有着不同的审美习 惯, 污染土壤修复的美学标准应尽可能与当地地理气 候、物种分布等实际情况相一致。修复竣工后的场地 也必须与当地环境相容, 并和谐地成为整个环境整体 的一个有机组成部分, 在视觉上也要使人愉快,这是 放射性核素污染场地修复必须遵循的基本美学标准。 从空间和时间上看, 修复竣工后场地地表生态景观及 其演替趋势应与当地的自然风光及地形和谐, 并符合 人们的时代审美需求。

将美学标准作为一种价值观引入放射性核素污 染土壤修复领域,有助于人们辩证地认识并解决修复 所面临的实际问题,有助于人们树立修复与可持续发 展并重的理念, 探索生态系统（乃至基因）的完整性、和 谐性与修复技术间的共融和协同关系,进而实现拟修 复场地的可持续利用与当地社会经济发展的良性互 动。

虽然西方国家将美学标准引入到海滨环境质量 研究已有近 30 年的历史, 包括对地形地貌、生态植被 和水体的环境质量的评价［11］, 但用美学的思想指导污 染土壤修复工作几乎是一块空白。其中原因之一可能 是, 传统的放射性核素污染土壤比活度-剂量标准以 及生物多样性标准均可采用一系列量化指标, 而美学 标准很难量化, 只能凭感官、视觉和心理反应做出评 价, 带有浓厚的主观色彩。例如,对植物修复过程中物 种的选择,不同的机构、不同的研究人员有不同的看法和审美观点,从时空角度很难进行把握。

1. 放射性核素污染土壤修复标准的分类

从标准的适用范围来看,放射性核素污染土壤修 复标准可以大致分成两类： 一类是根据场地实际情况 制定的实地标准( site- specific criteria) ,该标准更接近 场地的实际情况。实地标准一般是在计算放射性核素 对人类或环境风险的基础上制定的, 用这一方法制定 出的标准可能更适合场地的实际情况, 涉及到放射性 核素种类、分布、比活度及其可能的暴露途径以及土 壤、气候、水文、气象、人口等实际情况。但由于场地条 件差异往往较大, 要满足同一场地风险水平, 必须对 不同污染场地实施不同的实地清洁标准, 从而可能引 发社会或政治方面的不公平性争议。另一类是通用标 准(generic criteria),该类标准的适用范围更广。一般 情况下, 通用标准也要考虑环境的风险问题, 但它与 被调查场地的条件关系不大。通用标准适用于一个地 区或国家的所有场地, 它最大的好处包括： (1)具有重 要的政治意义, 易被政府层管理人员接受 ; ( 2) 由于通 用标准给出的是同一修复水平, 因而不需对特殊的种 群进行特殊处理; (3)简洁明了, 易于管理与实施。通 用标准的不足之处是推广使用存在一定的难度。如果 一刀切、坚持推广使用通用标准, 某些地方的修复成 本就很可能相对于实地标准会有一个大幅度提高的 现象, 从而造成资金浪费。

此外, 还有所谓的“干预标准”或“行动标准”, 它 是从实际情况考虑,依据放射性核素污染场地的程度 决定是采取“干预”措施还是“行动”措施的定量标准。 美国科学家们提出许多适应于不同清洁对象的标准, 覆盖的剂量范围较大。但一般来说, 这些标准都倾向 于将实际的辐照剂量控制在每年为1 mSv以内。

1. 国外现有的放射性核素污染土壤修复标准 简介

由于场地特征、使用目的、核素检测技术等限制, 各国甚至同一国家不同地区制定的污染土壤修复标 准差异甚大。表 1 列出了国外一些主要机构制定的辐 射防护与修复标准。从该表知，EPA推行的是“下限” (bottom up)策略，倡导使用更严格的清洁标准，并要 求控制癌症发生率在1M0-6T>10-4之间。即便是在 非清洁的情况下， 也要求放射性核素产生的剂量不高 于15mrem・a-1。EPA自始至终反对任何高于上述风 险和剂量范围的辐照剂量限值。

ICRP 81 号文［21］建议用干预辐射防护体系作目前 的干预水平标准,认为：现存年剂量(existing annual dose)达到100 mSv时,进行干预是具正当性的;现存 年剂量未达到 10 mSv， 进行干预是不具正当性的; 现 存年剂量介于10 mSv与100mSv之间，是否进行干 预需进行评估后才能做出决策。 ICRP 在其 82 号文［22］ 中提出污染土地清洁的剂量标准， 适应于实际和应急 情况下放射性核素污染土地的清洁需求。

美国核管理委员会 (U.S. Nuclear Regulatory Commission，NRC) 在制定污染土壤清洁标准时倡导 “上限”(top down)策略，推行相对宽松的剂量限制标 准，倾向于制定以辐射剂量(radiation specific dose- based)为基础的标准，针对包括地下水和其他暴露途

| 颁布标准的机构 | 污染土填清洁或干预剂量标准  **(mrem • a'1)** | 终生过量癌风险估算值 | 备注 | 参考文献 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 美国**EPA** | **10** | **2X10“** | 适用于美国核管理委员会**(NRC**胺权管理设旌中 大气释放物限定 | 【**12]** |
| 美国**E”** | **15** | **1 x ioJ x io"\*** | 适用于超级基金场地修复 | **[13]** |
| 国际辐射防护委员会**QCRP”** 美国国家辐射防护与测童委员 会**(NCRP)** | **100** | **2X103** | 适用于所有入造和天然放射性暴露 | 【**14**、**15]** |
| 美国核管理委员会**(NRC)** | **25** | **5X10^** | 遵循“合理使用低剂量原则” | **[16]** |
| 美国核管理委员会**(NRC)** | **25** | **5X10"4** | 适应于废物储存实验性工厂**(WH**爭)和**Yucca**山高 放废物释放引起的公众暴露 | **[16**、 **17]** |
| 美国孩管理委员会**NRC** | **100** | **2X103** | 个别情况 | **[17]** |
| 国际原子能机构**(IAEA)** | **15** | **1 X 10J X 10“** |  | **[18]** |
| 美国国土与安全局 | **100-10000** |  |  | **[19]** |
| 美国“铀矿选冶尾矿辐射控 | W背景值**SpCig1** |  | 地表**15 cm**以内 | **[20]** |
| 制法案” | W背景值**15 pCi g'1** |  | 地表**15 cm**以下 | **[20]** |

表1各国际机构的辐射防护与修复标准

Ttb)le 1 ROdliation protection and lemediation standards set by various international agencies

农业环境科学学报

第 26 卷第 2期

径设定的暴露风险值为25 mrem\*a-1**o** NRC在其颁布 的《许可证到期后的放射标准》［16］中规定, 清洁标准以 有 效剂量(effective dose equivalent) 25 mrem\* a-1 作为 初始标准,相当于5沁0-4终生癌症风险水平。个别情 况下,清洁标准可达到100 mrem\*a-1有效剂量,相当 于2X10-3终生癌症风险水平。

EPA与NRC本着从保护公共卫生、安全和环境 的角度出发于 2002 年达成了一份谅解备忘录, 目的 是为两机构在核管会授权场地退役和除污方面建立 一个基本的框架, 以促进相关决策的进行。表 2 列出 了该备忘录中给出的放射性核素污染土壤修复标准。 由该表知, 土地使用目的不同, 其修复标准差异较大。

在脏弹清洁指南中, 美国国土与安全局提出的清 洁基准为100T0 000mrem・a-1,明显高于EPA提出 的保护公共健康的剂量与风险范围。

美国“铀矿选冶尾矿辐射控制法案(UMTRCA) ”0］ 针对 226Ra,228Ra, 230Th, 232Th 核素的比活度限制标准为： 地表15 cm以内不得高于背景值5 pCi\*g-1,地表15 cm以下不得高于背景值15pCi・g-1。这些标准是根据 场地实际情况提出的, 适用于联邦政府法律管辖的铀 尾矿区放射性核素污染环境的治理。将放射性核素比 活度与剂量联系起来时必须研究场地的实际情况,如 场地污染物分布、性质以及未来场地使用计划等。因 此, 上述标准的确定与有效剂量当量 ( effective dose e­quivalent) 15 mrem\*a-1的关系不明显。但分析表明， UMTRCA 场地清洁标准与 居民暴露模式下 226Ra、 228Ra、232Th 的最小可接受剂量限值是一致的； 对 230Th 来说,UMTRCA清洁标准还要更严一些;对于非居民 使用模式如商业/工业、娱乐模式来说, 所有放射性核 素的UMTRCA清洁标准都显得更加严格一些。

美国能源部、国家环保局和科罗拉多州公共卫生 与环境部于 1996 年联合推出了部分放射性核素污染 土壤行动水平(表 3)。该表反映, 不同的暴露模式下 单个放射性核素污染土壤行动水平差别也很大。针对 落基山地区场地放射性核素污染土壤修复行动制定 的清洁标准, 它比世界其他地方建立的放射性核素污 染土壤修复标准要高得多［24、25］。

1. 结论

放射性核素污染土壤修复标准的制定,明显不同 于重金属和有机污染土壤修复的标准制定, 它可能涉 及到跨部门、跨行业的合作, 与放射生态学、放射毒理 学的研究水平有关, 是集法律法规、监测水平、场地特

衰2 EPA与NRC达成的备忘录中给出的放射性核素 污染土壊修复标准

Table 2 Cleanup ttnndards frr remediation of addiouuclide contmiintted soils 卩“眈口浸 in the 呃皿0恒厨口皿 eaached by EPA nnd NRC^ppCig))

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 放射性核素 | 居民用地：土壤比活度 | 工业/商业用地：土壤比活度 |
|  | **228** | **423** |
|  | **46** | **123000** |
|  | **9** | **14** |
|  | **19600** | **32 200 000** |
|  | **6** | **10 700** |
|  | **13 500** | **3 740000** |
| **%** | **105** | **169** |
|  | **69** | **112** |
|  | **269 000** | **2210000** |
|  | **873** | **1420** |
|  | **4** | **6** |
|  | **20 800** | **1230000** |
| **©Ni** | **9 480** | **555 000** |
| **%Sr+D** | **23** | **1070** |
| *94Nb* | **2** | **3** |
| **Fc** | **25** | **89 400** |
| **129I** | **60** | **1080** |
| **1MCs** | **16** | **26** |
| 137Cs+D | **6** | **H** |
| 1?2Eu | **4** | **7** |
| 154Eu | **5** | **8** |
| "It | **336** | **544** |
| **210Pb+D** | **15** | **123** |
|  | **5** | **5** |
| **”Ac+D** | **10** | **21** |
| **22aTh+D** | **15** | **25** |
| **B2Th** | **5** | **5** |
| **%** | **401** | **3310** |
|  | **20** | **39** |
| **y8U+D** | **74** | **179** |
| 总铀 | **47 mg • kg\*1** | **1 230 mg • kg"** |
| **^Pu** | **297** | **1 640** |
|  | **259** | **1 430** |
| **241Pu** | **40600** | **172000** |
| 如**Am** | **187** | **568** |
| **^Cm** | **32 200** | **344 000** |
| **243Cm** | **35** | **67** |

性调查、场地使用目的、天然辐照背景调查、放射性核 素的地质与地球化学特性研究等于一体的综合产物。 随着我国核工业的发展和核技术的广泛应用, 放射性 核素污染土壤修复的标准问题是必须要解决的重要 理论与实际问题。

参考文献：

［1］ United States Environmental Protection Agency(USEPA) (20460. OS-

| *3* 3分分放射性核污污染土行行动水平MS(pCi・g")  T訪3 3 Acnon levels of w)me radionuclides u託d fbr soil mmediation @Ci •『) | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 放射性核素 | 一级行动水平 | | | 二级行动水平 |
| 开阔的空间暴露模式  **15 mrem • a4**剂量限 | 办公室工作人员暴腐模式  **15 mrem • a'1**剂量限 | 设想的居民暴露模式  **85 mrem • a"1**剂量限 | 设想的居民暴禧模式  **15 mrem • a4**剂量限 |
| **241 Am** | **1 283** | **209** | **215** | **38** |
|  | **10580** | **1 164** | **1529** | **270** |
|  | **9 906** | **1088** | **1429** | **252** |
| % | **9 919** | **1089** | **1432** | **253** |
| **MlPu** | **48 020** | **7 801** | **19 830** | **3 499** |
| 24叽 | **10 430** | **1 145** | **1 506** | **266** |
|  | **11 500** | **1627** | **1738** | **307** |
|  | **1 314** | **113** | **135** | **24** |
|  | **5 079** | **506** | **586** | **103** |

WER No. 9200). Establishment of Cleanup Levels for CERCLA Sites with Radioactive Contamination [S]， August 22， 1997， 1- 18.( available at http：//[www.epa.gov/radiation/cleanup/documents.html](http://www.epa.gov/radiation/cleanup/documents.html))

1. IAEA An application of radiation protection principles to the cleanup of contaminated areas. Interim Report for comment. IAEA TecDoc- 987， IAEA Vienna[S]. 1998.
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure. Publication No. 82， Pergamon Press， Oxford， New York[S]. 2000.
3. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Guidance on the characterisation and remediation of radioactively contaminated land

[S]. 2002， 1- 51.

1. 周启星.污染土壤修复标准建立的方法体系研究[J].应用生态学报, 2004, 15(2)**3**16-320.
2. 唐世荣编著.污染环境植物修复的原理与方法[M].北京:科学出版 社,2006.1-291.
3. 晁 雷,周启星，陈 苏.建立污染土壤修复标准的探讨[J].应用生态 学报,2006, 17(2):331- 334.
4. 国家环境保护总局(HJ- 53- 2000)拟开放场址土壤中剩余放射性可 接受水平规定(暂行)[S]. 2000.

叨马克平•生物多样性的测度方法[M].//钱迎倩，马克平•生物多样性的 原理与方法.北京:中国科学技术出版社,1994.141-165.

1. 卞正富，张国良.生物多样性指数在矿山土地复垦中的应用[J].煤 炭学报,2000,25(1):76-80.
2. Morgan R， Liu H B. Coastal aesthetic pollution: a comparison of the U. K. and China[J]. 海岸工程， 1999， 18(4):35- 45.
3. EPA. 40 - - Protection of Environment. PART 60- Standard of Perfor­mance for New Stationary Sources. Subparts H and I. e - CFR Data， January 29， 2007.
4. EPA. 40- - Protection of Environment. PART 300- National Oil and Harzardous Substances Pollution Contingency Plan. Subpart E - Haz­ardous Substance Response 300.430: Remedial Investigation/Feasibil- ity Study and Selection of Remedy. e- CFR Data， January 29， 2007.
5. ICRP (International Commission on Radiological Protection). Annual limits on intake of radionuclides by workers based on the 1990 recom­mendations. ICRP Publication 60. Oxford: Pergamon Press. 1991.
6. NCRP. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Report 1 1 6. National Council on Radiation Protection and Measurements， Bethesda， Maryland. March 31， 1993.
7. NRC (Nuclear Regulatory Commission). 10 CFR Part 20- Radiological Criteria for License Termination. Final Rule， Fed. Registr. 62:39058- 39092，1997.
8. EPA. 40- - Protection of Environment. Part 194- Criteria for the Certi­fication and Recertification of the Waste Isolation Pilot plants ' s Compliance with the 40 CFR Part 191 Disposal Regulations. Subpart C - Compliance Certification and Re - certification Individual and Ground- water Protection Requirements. 194.51 (Consideration of pro­tected individual). e- CFR Data， January 29， 2007.
9. IAEA 1988. Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Radiological Control， IAEA Report Safety Series No. 89. International Atomic Energy Agency， Vienna， Austria. 1988.
10. Mobbs S， Cooper J ， Oatway W. Review of dose criteria for cleanup of contaminated land. 2005.
11. United States Congress. Uranium Mill Tailings Radiation Control Act (UMTRCA).1978.(available at http://www.wise- uranium.org/ulus.html)
12. ICRP. Publication 81: Radiation Protection Recommendations as Ap­plied to the Disposal of Long- lived Solid Radioactive Waste， Annals of the ICRP Volume 28/4. Elsevier， 2000.
13. Jensen P H. ICRP publication 82 on protection against prolonged expo­sure- application in accident situations. Radiological Protection in the 2000s - theory and practice. Nordic Society for Radiation Protection， 13th OrdinaryMeeting， Turku， Finland， 2002， 25- 29.(available at http: //[www.risoe.dk/rispubl/NUK/nukartikler/pdfartikler/Aabo\_PHJ.pdf](http://www.risoe.dk/rispubl/NUK/nukartikler/pdfartikler/Aabo_PHJ.pdf))
14. Whitman C T， Meserve R A. Memorandum of understanding between the Governmental Protection Agency and the Nuclear Regulator Com­mission: Consultation and finality on decommissioning and decontami­nation of contaminated sites. 2002， 1- 7.(available at <http://www.nrc>. gov/what- we- do/regulatory/decommissioning/reg- guides- comm.html)
15. The US Department of Energy (USDE)， the US Environmental Protec­tion Agency ( USEPA) ， the Colorado Department of Public Health and Environment( CDPHE) . Action levels for radionuclides in soils for the Rocky Flats cleanup agreement. 1996. (available at <http://www.rmpjc>. org/19/96/pjal896.html)
16. GAO( United States General Accounting Office) .Radiation standards: scientific basis inconclusive， and EPA and NRC disagreement contin- ues，testimony before the subcommittee on Energy and Environment， Committee on Science， U.S. House of Representatives. GAO/T- RCED- 00- 252. 2000. (available at <http://www.philrutherford.com/GAO_252_> testimony.pdf)