

新疆某露天煤矿放射性水平调查及人员受照剂量评价

许慧萍, 赵洋

中国原子能科学研究院, 北京 102413

摘要: **目的** 对新疆某开采多年的伴生放射性大型露天煤矿的各场所 γ 剂量率水平和氡浓度水平进行调查和分析; 并评价从业人员所受有效剂量。**方法** 采用便携式 γ 剂量率仪 FH40G 对矿区进行定点监测, 利用连续测氡仪对场所内氡浓度水平进行 24 h 连续监测; 并根据测量的 γ 剂量率和氡浓度估算人员受照剂量。**结果** 该露天煤矿 γ 剂量率范围为 51.4~435.8 nGy/h, 氡浓度 24 h 平均值为 15~25 Bq/m³, 人员年有效剂量范围为 0.29~1.29 mSv/a。**结论** 各场所氡浓度水平较低, 不需要采取补救行动; 大部分场所人员受照剂量远远低于标准要求, 排土场局部地区需要采取一定的防护措施。

关键词: 露天煤矿; γ 剂量率; 氡浓度; 受照剂量

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)01-0006-04

Investigation of radioactivity level in an open-pit coal mine in Xinjiang, China and evaluation of personnel exposure dose

XU Huiping, ZHAO Yang

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China

Abstract: **Objective** To investigate and analyze the levels of γ dose rate and radon concentration at all sites in a large open-pit coal mine with radioactivity that had been mined for many years in Xinjiang, China, and to estimate the effective dose exposed to the personnel. **Methods** A portable γ dose-rate instrument FH40G was used for fixed-point monitoring of the mining area, and a continuous radon detector was used for 24 h continuous monitoring of radon concentration level in the site. The personnel exposure dose was estimated according to the measured γ dose rate and radon concentration. **Results** In this open-pit coal mine, the range of γ dose rate was 51.4-435.8 nGy/h; the mean 24 h radon concentration was 15-25 Bq/m³; the range of annual effective dose to the personnel was 0.29-1.29 mSv/a. **Conclusion** According to the results of the survey, radon concentration levels at all sites are low, and no remedial action is required. The personnel exposure dose at most of the sites is far below the standard requirements, and some protective measures need to be taken in some areas of the dump.

Keywords: Open-pit coal mine; γ Dose rate; Radon concentration; Exposure dose

我国是世界上矿产资源种类较齐全国家之一^[1], 受地质背景及成矿等因素影响, 各类矿产资源或同一矿产资源不同位置虽然含有天然放射性但其伴生的放射性种类及含量不尽相同。随着矿产资源的开发利用, 我国对伴生放射性矿产资源的开发利用过程中造成的辐射环境影响也越来越重视, 并开展了一系列的相关工作, 通过全国伴生放射性矿的普查逐步建立了伴生放射性矿开发利用企业名录, 并将这些伴生放射性矿企业纳入监管范围; 根据全国伴生放射性矿普查结果可知, 纳入我国辐射环境监管要求的企业涉及 15 类矿产资源开发利用企业^[2], 其中煤矿属于 15 类企业之一。矿产资源在其开发利用过程中其

伴生的天然放射性核素将会发生转移和富集, 从而对其从业人员及周围环境造成一定的辐射影响; 已有相关研究表明在离子型稀土矿、地下煤矿、石煤等伴生放射性矿产资源的开发利用对其从业人员及环境有一定的辐射影响^[3-8]。

新疆某露天煤矿已开采多年, 在地勘探阶段均匀布设 41 口钻孔, 根据各钻孔中放射性情况分析, 其中位于矿区西北角 5 个钻孔的煤层顶部存在放射性异常, 根据该部分钻孔样品分析结果中 U、Ra 的品位判断该区域的煤层顶部存在铀系单一核素超过 1 Bq/g, 其埋藏深度最大为 17 m, 放射性异常厚度最大为 6 m。目前放射性异常区域已开采完毕, 剥离的含天

然放射性核素大于 1 Bq/g 的废石(土)、风化煤已运至排土场填埋。

本文通过对该开采多年的大型露天煤矿采选企业矿区历史勘探资料的分析,结合其场所现状环境 γ 剂量率水平和氡浓度水平的调查情况,摸清该矿区环境中的现状辐射水平,并根据现状监测数据估算相关从业人员年有效剂量,对其辐射影响进行评价,为该公司的辐射防护以及人员的健康防护提供借鉴。

1 对象与方法

1.1 调查对象 某露天煤矿位于我国新疆,属于大型露天煤矿,建设规模为 10.0 Mt/a。该煤矿于 2009 年开始槽探剥离,2014 年达产,主要产品为大块煤、块煤和混煤,开采方式为露天开采,开采工艺为单斗-卡车—半移动破碎站—带式输送机半连续开采。截止目前该露天煤矿已开采 10 年,已开采的采场地表面积约 6.8 km²,开采过程中产生的废石(土)运至 3 个外排土场和 1 个内排土场填埋,配有 2 个选煤厂和办公区域;该露天矿工作人员主要包括原煤生产人员和管理人员,原煤生产工作人员每年工作 330 d,每日 3 班,每班工作 8 h。在进行第二次污染源普查时,监管部门发现该露天煤矿开发利用活动中产生的尾矿中铀系单个核素含量存在超过 1 Bq/g 情况,因此将该企业纳入了伴生放射性矿企业名录。

1.2 调查方法

1.2.1 历史资料分析 收集整理历史勘察资料中关于放射性调查情况,根据调查资料确定露天煤矿伴生放射性水平分布情况。

1.2.2 现场监测

1.2.2.1 γ 辐射剂量率监测 使用型号为美国赛默飞世尔科技公司的 FH40G-X + FHZ672 便携式辐射剂量率仪对矿区露天采场、选煤厂、排石(土)场、矿区周界、办公生活区域等进行现场监测,以定点的测量方式进行。监测时,便携式监测仪表离地 1 m 高,每点测量 10 次,每次间隔 5 s,取平均值。

1.2.2.2 氡浓度监测 采用美国 DURRIDGE 公司的 RAD7 连续测氡仪对矿区露天采场、选煤厂、排石(土)场、办公生活等区域的氡浓度进行测量,测量周期为 1 h,测量模式为 Normal,连续测量,取扣除第 1 h 后连续 24 h 氡浓度平均值。

1.2.2.3 样品分析 样品中铀采用液体激光荧光法分析,样品中镭-226、钍-232 采用 BH1936 型低本底 γ 谱仪分析。根据各场所 γ 剂量率监测结果,选取各

场所中 γ 剂量率最大点分别取 1 个样品进行分析。

1.3 评价模式 从业人员受照剂量主要由外照射和内照射组成,其中外照射主要由 γ 辐射引起,内照射主要由氡及其子体吸入引起。

1.3.1 外照射剂量估算 外照射剂量计算公式如下:

$$E_{\gamma} = 0.7 \cdot T \cdot (D - D_0) \quad (1)$$

式中, E_{γ} 为从业人员年所受 γ 外照射的有效剂量, Sv; 0.7 为空气吸收剂量率与个人有效剂量换算因子, Sv/Gy; T 为年工作时间, h/a; D 为场所中空气吸收剂量率; D_0 为当地的空气吸收剂量率本底值。

1.3.2 内照射剂量估算 氡及其子体吸入内照射剂量计算公式^[9] 如下:

$$E_{Rn} = C_{Rn} \cdot D_{gas} \cdot T + F \cdot C_{Rn} \cdot D_{progeny} \cdot T \quad (2)$$

式中, E_{Rn} 为氡及其子体所致工作人员的有效剂量, Sv/a; D_{gas} 为氡的剂量转换因子,取 1.7×10^{-10} Sv/(Bq · h · m⁻³), F 为平衡因子,取 0.5; C_{Rn} 为场所氡浓度, Bq/m³; $D_{progeny}$ 为氡子体剂量转换因子, 9.0×10^{-9} Sv/(Bq · h · m⁻³); T 为年有效工作时间, h/a。

2 结果

2.1 现场调查结果

2.1.1 γ 剂量率 露天煤矿各场所中 γ 辐射剂量率水平监测结果见表 1。露天采场、排土场 1、排土场 3、内排土场、选煤厂及办公区域剂量率水平为 53.1~136.2 nGy/h,均位于当地本底波动范围内;排土场 2 存在个别 γ 剂量率异常区域,最大值为 435.8 nGy/h,最高值已超出当地室外本底范围最大值约 3 倍。

表 1 各场所中 γ 辐射剂量率

Table 1 Dose rates of γ radiation at each site

场所名称	剂量率/(nGy/h)
露天采场	58.8~130.0
排土场1	102.6~136.2
排土场2	54.6~435.8
排土场3	57.4~87.4
内排土场	51.4~119.2
1号选煤厂	53.1~81.3
2号选煤厂	69.7~89.2
办公区域	63.5~135.2
区域调查水平 ^[10]	室外 γ 辐射剂量率
	室内 γ 辐射剂量率
	62.9~116.0
	86.9~153.7

2.1.2 氡浓度水平 各场所氡浓度监测结果见表 2。矿区内各场所氡浓度 24 h 平均值范围为 14~25 Bq/m³, 最大值为办公场所。各场所的氡浓度水平与矿区上风向对照点氡浓度(为 12 Bq/m³)相比, 略高于上风向西北边界氡浓度水平, 但远远低于 GB 18871—2002 中规定的采取补救行动的行动水平 500 Bq/m³^[11], 不需要采取补救行动。

表 2 各场所氡浓度水平

Table 2 Radon concentration level at each site

场所	氡浓度水平/(Bq/m ³)	
	浓度范围	平均值
排土场	6~54	23
办公区域	4~62	25
露天采场	4~28	15
选煤厂	2~51	15
西北边界(上风向)	2~36	12

2.1.3 样品中放射性核素含量分析 选取的各场所 γ 辐射剂量率最大点对应样品中天然放射性核素活度浓度情况见表 3。调查阶段各场所中 γ 剂量率最大点对应的样品中除排土场 2 外其他区域样品中天然放射性核素活度浓度均位于该区域土壤中天然放射性核素活度浓度范围内。从监测数据中可以看出, 排土场 2 剂量率最大点对应样品中 ²³⁸U 和 ²²⁶Ra 的活度浓度超过了 1 Bq/g, 该部分固体废物属于天然放射性固体废物。

表 3 各样品中天然放射性核素分析结果

Table 3 Results of natural radionuclide analysis in each sample

场所	核素活度浓度/(Bq/kg)			
	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K
露天采场	≤ LD=19	4.06	≤ LD=3.1	34.2
选煤厂	25.6	14.2	12.0	351
排土场1	51.2	17.5	26.4	477
排土场2	1 380	61.9	1 130	313
排土场3	36.0	33.3	23.7	784
内排土场	29.4	23.6	19.1	473
区域土壤 ^[12]	14.15~56.73	22.92~45.89	22.69~42.40	433.2~782.0

注: LD为探测限, LD ²³⁸U = 19 Bq/kg, LD ²²⁶Ra=3.1 Bq/kg。

2.2 剂量估算 从表 1 和表 2 可知矿区各场所中 γ 剂量率水平及氡浓度水平, 结合矿区每班工作时间和每年工作天数, 计算得出各场所工作人员 γ 外照射年有效剂量和吸入内照射年有效剂量, 具体见表 4。

表 4 各场所人员年有效剂量

Table 4 Annual effective dose exposed to the personnel at each site

场所	年有效剂量/(mSv/a)		
	外照射	内照射	合计
排土场2	1.01	0.28	1.29
办公区域	0.22	0.31	0.53
露天采场	0.21	0.19	0.40
选煤厂	0.10	0.19	0.29

从计算结果可知, 该露天煤矿各场所工作人员年有效剂量为 0.29~1.29 mSv/a, 最大值为排土场 2 的工作人员年有效剂量。通过分析可知各场所中工作人员受吸入氡及其子体的造成的内照射影响相差不大。排土场 2 的工作人员年有效剂量远远高于其他区域工作人员主要原因是该区域存在部分点位 γ 剂量率远远高于其他场所。

从计算结果可以看出办公区域、露天采场及选煤厂的工作人员年有效剂量低于 GB 18871^[11] 附录 B 中规定的公众剂量限值(1 mSv/a)。排土场 2 工作人员年有效剂量超过了 GB 18871^[11] 附录 B 中规定的公众剂量限值(1 mSv/a)但远远低于 GB 18871^[11] 附录 B 中规定的由审管部门决定的连续 5 年的职业照射年平均有效剂量(20 mSv), 其工作人员年有效剂量主要受 γ 外照射影响, 占年有效剂量的 82%。

3 讨论

本次调查的伴生露天煤矿各场所氡浓度水平变化不大, 且远远低于矿井开采的伴生放射性煤矿场所中氡浓度水平^[4, 13] 和 GB 18871 附录 H 中的采取补救行动的浓度水平^[11], 因此, 该伴生露天煤矿虽然纳入了全国伴生放射性矿名录, 但涉及的各场所氡浓度水平很低, 因此不需要采取额外的降氡措施就能满足工作场所氡浓度控制水平要求。

从露天煤矿 γ 辐射剂量率调查情况和人员受照情况分析, 除排土场 2 外其他区域剂量率水平在当地本底范围内, 不需要采取额外的防护措施。对于排土场 2 存在 γ 剂量率较高的情况且人员受到一定剂量, 根据进一步取样分析可知, 其排土场 2 γ 剂量率异常主要是局部排弃的废石(土)中存在单个核素活度浓度超过 1 Bq/g, 属于伴生放射性固体废物。根据 HJ 1114—2020^[14] 要求, 伴生放射性固体废物应按要求进行处置和填埋。从该露天煤矿运行情况可以看

出,该露天煤矿已开采 10 年,其排土场 2 已临近封闭,历史开采期间根据当时情况未对其伴生放射性关注,开采出来的资源已经应用到市场,剥离出来的废石(土)按照一般固体废物填埋。由于历史上未曾关注过伴生放射性使得企业一方面无法对其历史开采过程中对环境和人员造成的辐射影响进行追溯,另外对已填埋的含伴生放射性固体废物若重新处置对企业也造成一定的影响,因此建议企业根据排土场所在位置、环境情况以及结合代价利益情况,采取以下的措施减少排土场 2 排满后对环境的辐射影响:1)在排土场 2 封闭前对其进行详细的 γ 辐射剂量率水平调查,摸清剂量率异常区域的范围情况;2)对 γ 辐射剂量率异常区域覆盖一定厚度的土壤,使其表面剂量率水平降至当地本底水平;另外在覆土上面喷洒结壳剂,使覆土区域凝结成块,减少风蚀影响;3)在排土场周围设置土石围堰,定期进行巡查,防止滑坡或者塌方致使其中的含天然放射性核素的固体废物逸出,从而对周围环境造成一定的辐射影响;4)周围设置警戒标识,防止无关人员进入破坏排土场。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 许慧萍负责论文基本框架、历史资料收集、剂量计算和数据分析;赵洋负责现场监测和数据处理

参考文献

- [1] 张奇,崔宏星,张震,等.湖南某铅锌金矿井下放射性水平调查与评价[J]. *中国辐射卫生*, 2017, 26(2): 159-161. DOI: 10.3969/j.issn.1004-714X.2017.02.010.
Zhang Q, Cui HX, Zhang Z, et al. Investigation and evaluation of radioactivity level of a lead-zinc-gold mine in hunan[J]. *Chin J Radiol Health*, 2017, 26(2): 159-161. DOI: 10.3969/j.issn.1004-714X.2017.02.010.
- [2] 郑国峰,廖运璇,柏学凯,等.全国伴生放射性矿普查结果分析及监管建议[J]. *环境保护*, 2020, 48(18): 38-41. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.18.007.
Zheng GF, Liao YX, Bai XK, et al. Analysis of the results of the second national pollution source census of NORMs and suggestions for supervision[J]. *Environ Prot*, 2020, 48(18): 38-41. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.18.007.
- [3] 王春红,刘森林,廖海涛,等.离子型稀土矿辐射水平及其所致工作人员剂量[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29(2): 168-172. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.02.018.
Wang CH, Liu SL, Liao HT, et al. Investigation on radiation levels of ion-absorbed rare earth mines and dose assessment to workers[J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29(2): 168-172. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.02.018.
- [4] 许慧萍,李军.新疆某地煤矿放射性水平调查及从业人员剂量分析[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30(1): 44-47. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.010.
Xu HP, Li J. Investigation on radiation level in certain coal mines in Xinjiang and dose analysis of employees[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30(1): 44-47. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.010.
- [5] 岳锡宏,刘飏,王玉文.新疆煤中天然放射性和铀伴生煤矿潜在职业照射[J]. *中国辐射卫生*, 2018, 27(3): 255-258. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.03.017.
Yue XH, Liu B, Wang YW. The level of natural radionuclide concentration in Xinjiang coal and potential occupational exposure to uranium associated coal mine[J]. *Chin J Radiol Health*, 2018, 27(3): 255-258. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.03.017.
- [6] 冯奕达,张保生.伴生矿开发利用对环境的放射性影响及污染防治措施[J]. *环境与发展*, 2018, 30(5): 76-77,85. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.05.046.
Feng YD, Zhang BS. The associated ore development and utilization of environmental radiation and pollution prevention and control measures[J]. *Environ Dev*, 2018, 30(5): 76-77,85. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.05.046.
- [7] 王欣,陈英民,王垒,等.山东省矿井下工作人员职业性照射初步评价[J]. *中国辐射卫生*, 2018, 27(3): 273-275. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.03.022.
Wang X, Chen YM, Wang L, et al. A primary assessment of occupational exposure to underground miners in Shandong Province[J]. *Chin J Radiol Health*, 2018, 27(3): 273-275. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.03.022.
- [8] 陈玮,於国兵,陈志,等.皖南石煤开发利用对周围环境放射性水平影响调查[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28(5): 550-553. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.020.
Chen W, Yu GB, Chen Z, et al. Radioactive level of some stone coal mines and the dose survey of surrounding residents in Southern Anhui[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28(5): 550-553. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.020.
- [9] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 182—2006 室内氡及其衰变产物测量规范[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2007.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GBZ/T 182—2006 Specifications for monitoring of indoor radon and its decay products[S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2007.
- [10] 刘鄂,石振原,郭献东,等.新疆维吾尔自治区环境天然贯穿辐射水平调查研究[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区环境监测中心站, 1989.
Liu E, Shi ZY, Guo XD, et al. Investigation on environmental natural penetrating radiation level in Xinjiang Uygur Autonomous Region[R]. Urumqi: Environmental Monitoring Center Station of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1989.

- 2020.
- National Health Commission of the People's Republic of China. WS 674—2020 Specification for testing of quality control in medical linear accelerator[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ 121—2020 放射治疗放射防护要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- National Health Commission of the People's Republic of China. GBZ 121—2020 Requirements for radiological protection in radiotherapy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [5] 林玉峰. 安全防护——医用加速器质量控制的重点[J]. 中国医疗设备, 2011, 26 (2): 9-11, 151. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2011.02.003.
- Lin YF. Safety precaution: an important part of medical accelerator quality control[J]. China Med Dev, 2011, 26 (2): 9-11, 151. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2011.02.003.
- [6] 董颖, 吴应宇, 唐孟俭, 等. 2017—2019年广西省部分医用电子直线加速器质量控制检测结果分析[J]. 中国辐射卫生, 2021, 30 (4): 407-411. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.04.004.
- Dong Y, Wu YY, Tang MJ, et al. Analysis of quality control test results of medical electron linear accelerators in Guangxi Province 2017—2019[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30 (4): 407-411. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.04.004.
- [7] 杜翔, 杨春勇, 徐小三, 等. 江苏省2017—2018年部分医用电子直线加速器质量控制检测结果分析[J]. 中国职业医学, 2019, 46 (4): 501-503. DOI: 10.11763/j.issn.2095-2619.2019.04.023.
- Du X, Yang CY, Xu XS, et al. Analysis of quality control test results of medical electron linear accelerators in Jiangsu Province, 2017-2018[J]. China Occup Med, 2019, 46 (4): 501-503. DOI: 10.11763/j.issn.2095-2619.2019.04.023.
- [8] 王赟, 邬家龙, 张涵宇, 等. 甘肃省医用电子直线加速器质量控制及防护检测与评价[J]. 疾病预防控制通报, 2020, 35 (5): 78-80. DOI: 10.13215/j.cnki.jbyfkztb.2007016.
- Wang Y, Wu JL, Zhang HY, et al. Quality control and protection detection and evaluation of medical electron linear accelerators in Gansu Province[J]. Bull Dis Control Prev, 2020, 35 (5): 78-80. DOI: 10.13215/j.cnki.jbyfkztb.2007016.
- [9] 胡波, 李长虹, 刘冉, 等. 四川省医用直线加速器质量控制检测结果[J]. 医疗装备, 2019, 32 (7): 43-44. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2376.2019.07.023.
- Hu B, Li CH, Liu R, et al. Quality control test results of medical electron linear accelerators in Sichuan Province[J]. Med Equip, 2019, 32 (7): 43-44. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2376.2019.07.023.
- [10] 冯泽臣, 娄云, 万玲, 等. 北京市医用电子直线加速器性能检测结果分析[J]. 首都公共卫生, 2013, 7 (6): 244-247. DOI: 10.16760/j.cnki.sdggws.2013.06.004.
- Feng ZC, Lou Y, Wan L, et al. Testing and analysis on the performance characteristics of medical electronic linear accelerators in Beijing[J]. Capital J Public Health, 2013, 7 (6): 244-247. DOI: 10.16760/j.cnki.sdggws.2013.06.004.
- [11] 张帅, 格日勒满达呼, 哈日巴拉, 等. 内蒙古医用电子直线加速器性能检测结果分析[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25 (3): 326-328. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.03.025.
- Zhang S, Gerilemandahu, Haribala, et al. Analysis of performance test results of medical electron linear accelerators in Inner Mongolia autonomous region[J]. Chin J Radiol Health, 2016, 25 (3): 326-328. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.03.025.
- (收稿日期: 2022-07-22)

(上接第 9 页)

- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18871—2002 Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [12] 刘鄂, 王轶, 杜新宪, 等. 新疆维吾尔自治区土壤中天然放射性核素含量调查研究[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区环境监测中心站, 1989.
- Liu E, Wang Y, Du XX, et al. Investigation of natural radionuclide content in soil of Xinjiang Uygur Autonomous Region[R]. Urumqi: Environmental Monitoring Center Station of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1989.
- [13] 潘自强. 我国天然辐射水平和控制中一些问题的讨论[J]. 辐射防护, 2001, 21 (5): 257-268. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2001.05.001.
- Pan ZQ. Some issues regarding natural radiation level and control in China[J]. Radiat Prot, 2001, 21 (5): 257-268. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2001.05.001.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. HJ 1114—2020 伴生放射性物料贮存及固体废物填埋辐射环境保护技术规范(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. HJ 1114—2020 Technical specifications of radiation environmental protection for other radioactive material's storage and solid waste's landfill (Trial)[S]. Beijing: China Environmental Press, 2020.
- (收稿日期: 2022-07-18)