

某还原钛铁矿项目所致公众照射剂量分析

李明亮¹, 常青², 贾力博², 张巍², 蔡圃¹

(1. 广西博宇生态环境有限公司, 广西南宁 530000;
2. 广西壮族自治区辐射环境监督管理站, 广西南宁 530222)

摘要: 根据某还原钛铁矿(伴生放射性矿)项目运营时污染物的排放情况, 预测周围公众不同受照途径的个人有效剂量, 分析不同受照途径的贡献份额, 为估算该项目对公众产生的辐射剂量提供参考。研究表明, 项目运行所致公众最大个人有效剂量为 0.09 mSv/a, 关键照射途径为氡吸入内照射(贡献份额达 80.6%), 食入内照射贡献份额为 17.8%, 吸入放射性核素所致内照射贡献份额为 1.6%。项目对周围公众人员的辐射影响满足相关标准要求, 相对氡吸入内照射的贡献份额, 食入、吸入内照射的贡献份额较少, 但不可忽略。

关键词: 伴生放射性矿; 钛铁矿; 公众照射; 受照途径; 个人有效剂量; 贡献份额

中图分类号: TL7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)01-0117-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.06.09

中国是世界上矿产资源较丰富的国家之一。第1次全国污染源普查(2007年)确定的属于伴生放射性矿开发利用企业共1433家^[1], 第2次全国污染源普查(2017年)确定的属于伴生放射性矿开发利用企业共464家^[2-3]。伴生放射性矿开发利用企业较多, 在开发利用矿产资源过程中产生的放射性流出物会对周围环境及公众人员造成一定辐射影响^[4-7]。

为加强对伴生放射性矿开发利用项目的监督管理, 企业应履行辐射环境影响评价制度和竣工环境保护验收制度。在辐射环境影响评价过程中, 预测及估算伴生放射性矿开发利用对周围环境及公众人员产生的辐射影响是重要内容之一。但在已批复并公开的辐射环境影响评价报告中, 大部分报告在预测及估算时考虑的影响途径不够全面, 采用的预测及估算方法相对简单, 有的甚至没有对周围环境及公众人员产生辐射影响的预测及估算内容, 不能满足辐射环境影响评价要求。为此, 笔者对辐射环境影响评价中预测估算方法进行研究, 以为伴生放射性矿开发利用项目的辐射环境影响评价提供参考。

1 项目概况

1.1 基本情况

某还原钛铁矿项目利用煤将钛精矿还原, 得到还原钛铁矿。项目生产过程中无液态流出物及放射性固体废物产生, 主要考虑气载流出物对周围环境的辐射影响。

1.2 放射性污染源强

项目气载流出物主要是指通过有组织、无组织形式排放的废气颗粒物, 含有伴生放射性核素以及生产场所的氡及其子体。根据污染源测定结果, 生产场所氡活度浓度为 18.2~49.1 Bq/m³, 最大氡活度浓度出现在成品库。按最大氡活度浓度 49.1 Bq/m³ 进行预测分析。

废气颗粒物年排放量为 46.59 t/a, 废气颗粒物由不同原料、产品、中间产品、尾渣组成, 颗粒物中的伴生放射性核素的比活度均按所有物料的最大值进行预测分析, 其中 $a(^{238}\text{U}) = 680 \text{ Bq/kg}$ 、 $a(^{232}\text{Th}) = 2156 \text{ Bq/kg}$ 、 $a(^{226}\text{Ra}) = 716 \text{ Bq/kg}$ 。在伴生放射性核素自然衰变时无⁴⁰K产生;²¹⁰Po半衰期为 138 d, 自然衰变时其比活度相对²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra要小很多, 故研究中不考虑⁴⁰K和²¹⁰Po的影响。

收稿日期: 2024-06-25

第一作者简介: 李明亮(1990—), 男, 河南杞县人, 学士, 工程师, 从事环境咨询工作。

通信作者简介: 常青(1990—), 女, 陕西富平人, 学士, 工程师, 从事辐射环境监测与评价。

2 分析方法

本预测选取各参数取值均较保守。在估算时,假设整个项目场址内氡浓度均一致,且放射物物料堆场释放出来的氡全部被吹走;在食入内照射估算时,自给份额按 1 取值,动物摄入量、转移因子等参数均按大动物进行取值。

2.1 受照途径

项目周围公众人员因气载流出物而受到放射性污染的途径主要包括:浸没于空气中受到的外照射;干、湿沉降导致地面放射性沉积物引起的外照射;吸入空气造成的内照射;食入因干、湿沉降导致放射性沉积的粮食、蔬菜等食物造成的内照射;食入由干、湿沉降导致放射性沉积的饲料所喂养的家畜肉、奶及其制品造成的内照射。

2.2 剂量估算公式及参数

2.2.1 公众个人有效剂量

根据公众受照途径,公众个人有效剂量估算公式^[8]可以简化为

$$D = D_r + D_{Rn} + D_h + D_e, \quad (1)$$

式中: D —公众个人有效剂量, mSv/a; D_r —外照射有效剂量, mSv/a; D_{Rn} —吸入²²²Rn 所致内照射有效剂量, mSv/a; D_h —第 i 种核素吸入所致内照射有效剂量, mSv/a; D_e —第 i 种核素食入所致内照射有效剂量, mSv/a。

2.2.2 外照射有效剂量

该项目周围公众所受放射性外照射主要表现为矿尘的浸没外照射和由沉积在地表的矿尘所致的外照射。对于²³⁸U,地表沉积外照射为 5.5×10^{-19} (Sv/s)/(Bq/m²),空气浸没外照射为 3.4×10^{-18} (Sv/s)/(Bq/m³)^[9]。考虑到矿尘浸没与沉积所致公众的有效剂量相对于吸入放射性核素途径所致有效剂量小得多,因此忽略其对外照射有效剂量的贡献。

2.2.3 评价子区划分

为进行剂量估算,在评价半径为 2.5 km 内以 0.5、1.0、1.5、2.5 km 划分同心圆;再将这些同心圆划分为 22.5° 扇形段,以正北 N 向左、右各

划分 11.25° 为起始段,共划分 64 个子区。

2.2.4 吸入²²²Rn 所致公众个人有效剂量

采用简单箱体模型计算吸入氡所致内照射有效剂量,假设析出的氡在箱内均匀混合,根据场地中氡浓度计算公众剂量,其计算公式^[10]³⁶为

$$D_{Rn} = g_{Rn} \cdot t \cdot C_{Rn}, \quad (2)$$

式中: D_{Rn} —吸入²²²Rn 所致的内照射有效剂量, Sv/a; g_{Rn} —吸入²²²Rn 剂量转换因子,取 3.11×10^{-9} Sv/(Bq · h · m⁻³); t —时间,取 7 200 h/a; C_{Rn} —环境空气中²²²Rn 浓度增量, Bq/m³。

假设析出的氡在箱内均匀混合,采用简单箱体模型计算场所氡释放率,计算式为

$$R = C_{Rn} \cdot (U \cdot B \cdot H) / S, \quad (3)$$

式中: R —场地中氡析出率, Bq/(m² · s); C_{Rn} —场地中氡活度浓度,取最大值 49.1 Bq/m³; S —工作场所场地面积,取 38 304 m²; U —各风向年均风速,根据 2020 年气象数据年均风速为 4.78 m/s; B —垂直最高概率风向的场地宽度,主导风向为北风,取 168 m; H —箱体高度,取 10 m。

根据式(1)~式(3),计算出²²²Rn 析出率为 10.3 Bq/(m² · s),根据²²²Rn 析出率计算出工作场所氡释放率为 394 293 Bq/s。

2.2.5 吸入放射性核素所致公众个人有效剂量

吸入放射性核素所致公众个人有效剂量计算式^[11]为

$$D_h = C_{\pm} \cdot f_i \cdot t \cdot R \cdot G_i \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

式中: D_h —第 i 种核素吸入所致内照射有效剂量, Sv/a; C_{\pm} —附近居民吸入该项目排放的粉尘浓度, mg/m³; f_i —吸入矿尘第 i 种核素比活度, Bq/kg; t —公众停留时间(以年运行时间计), h/a; R —公众空气摄入速率, m³/h; G_i —第 i 种核素吸入剂量转换系数, Sv/Bq。

将有组织排放作为点源,无组织排放作为面源,采用《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 2.2—2018)^[12]中推荐的 AERMOD 模型,进行项目周围空气中颗粒物浓度预测。公众成员空气摄入速率(R)见表 1,公众成员吸入有效剂量转换系数(G_i)见表 2。

表 1 公众成员空气摄入速率^[13]

年龄组	0~11 岁	>1~2 岁	>2~7 岁	>7~12 岁	>12~17 岁	>17 岁
摄入量	0.19	0.28	0.42	0.58	0.63	0.71

表 2 公众成员吸入有效剂量转换系数^{[10]163}

Table 2 Effective dose conversion coefficient for inhalation by members of the public

Sv/Bq

核素	公众成员吸入有效剂量转换系数					
	0~1 岁	>1~2 岁	>2~7 岁	>7~12 岁	>12~17 岁	>17 岁
²³⁸ U	1.2×10^{-5}	9.4×10^{-6}	5.9×10^{-6}	4.0×10^{-6}	3.4×10^{-6}	2.9×10^{-6}
²³² Th	5.4×10^{-5}	5.0×10^{-5}	3.7×10^{-5}	2.6×10^{-5}	2.5×10^{-5}	2.5×10^{-5}
²²⁶ Ra	1.5×10^{-5}	1.1×10^{-5}	7.0×10^{-6}	4.9×10^{-6}	4.5×10^{-6}	3.5×10^{-6}

2.2.6 食入放射性核素所致公众个人有效剂量

食入放射性核素所致公众个人有效剂量计算式^[14]为

$$D_e = \sum_i [U_v \cdot (C_{v,1i} \cdot f_{v1} + C_{v,2i} \cdot f_{v2}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_v) + U_l \cdot (C_{l,1i} \cdot f_{l1} + C_{l,2i} \cdot f_{l2}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_l) + U_m \cdot (C_{m,1i} \cdot f_{m1} + C_{m,2i} \cdot f_{m2}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_m) + U_f \cdot (C_{f,1i} \cdot f_{f1} + C_{f,2i} \cdot f_{f2}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_f)] \cdot DF_{hi}, \quad (5)$$

式中: U_v 、 U_l 、 U_m 和 U_f 分别表示公众个人作物、蔬菜、牛奶和肉类消费量, kg/a 或 L/a; $C_{v,1i}$ 、 $C_{l,1i}$ 、 $C_{m,1i}$ 和 $C_{f,1i}$ 分别表示本子区生产的作物、蔬菜、牛奶和肉类内放射性核素 i 的含量, Bq/kg 或 Bg/L; $C_{v,2i}$ 、 $C_{l,2i}$ 、 $C_{m,2i}$ 和 $C_{f,2i}$ 分别表示评价区(不包括本子区)内生产作物、蔬菜、牛奶和肉类的加

权平均放射性核素 i 的含量, Bq/kg 或 Bg/L; f_{v1} 、 f_{l1} 、 f_{m1} 和 f_{f1} 分别表示公众个人食用本子区内生产作物、蔬菜、牛奶和肉类的份额(无量纲), 保守取 1; f_{v2} 、 f_{l2} 、 f_{m2} 和 f_{f2} 分别表示公众个人食用评价区(不包括本子区)内生产作物、蔬菜、牛奶和肉类的份额(无量纲), 保守取 0; t_v —作物从收获到被消费的时间间隔, 取 30 d; t_l —蔬菜从收获到被消费的时间间隔, 取 1 d; t_m —从挤牛奶到牛奶被消费的时间间隔, 取 1 d; t_f —产肉动物从屠宰到被消费的时间间隔, 取 1 d; λ_i —放射性核素 i 的衰变常数, 1/d; DF_{hi} —公众个人摄入放射性核素 i 的有效剂量转换因子, Sv/Bq。

公众个人摄入放射性核素 i 的有效剂量转换因子 DF_{hi} ^{[10]103} 见表 3。

表 3 食入单位摄入量所致有效剂量转换因子

Table 3 The effective dose conversion factor due to ingestion per unit intake

Sv/Bq

核素	公众成员年龄组					
	0~1 岁	>1~2 岁	>2~7 岁	>7~12 岁	>12~17 岁	>17 岁
²³⁸ U	3.4×10^{-7}	1.2×10^{-7}	8.0×10^{-8}	6.8×10^{-8}	6.7×10^{-8}	4.5×10^{-8}
²³² Th	4.6×10^{-6}	4.5×10^{-7}	3.5×10^{-7}	2.9×10^{-7}	2.5×10^{-7}	2.3×10^{-7}
²²⁶ Ra	4.7×10^{-6}	9.6×10^{-7}	6.2×10^{-7}	8.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	2.8×10^{-7}

根据《Safety Reports Series No. 19》中公式进行计算, 因气载流出物导致的作物、蔬菜、牛奶和肉类中放射性核素 i 的含量。

2.3 估算结果

根据调查结果, 参考《中国居民膳食指南》^[15-16], 确定该项目评价区内人群主要食谱及食物消费量, 然后通过公众不同受照途径有效剂

量计算式估算。在正常工况下公众成员通过吸入²²²Rn 所致个人有效剂量估算结果见图 1。可以看出, 个人有效剂量随距离增加而减少, 最大值出现在 E 方位 0~0.5 km 处。

不同距离不同年龄组公众成员, 通过吸入粉尘颗粒物而造成的伴生放射性核素内照射所致个人有效剂量估算结果见图 2。可以看出, 吸

入粉尘所致公众个人有效剂量随距离增加而逐渐减少,不同年龄组之间,>17岁的成人吸入粉尘所致公众个人有效剂量最大,0~1岁的婴儿

吸入粉尘所致公众个人有效剂量最小;最大值出现方位与主导风向有关,出现在主导风向下风向位置。

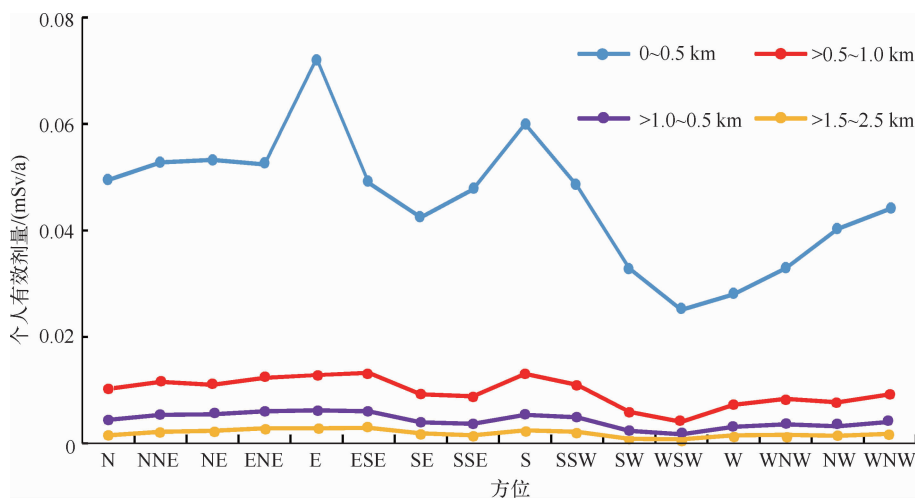


图1 吸入²²²Rn所致公众个人有效剂量(D_{Rn})

Fig. 1 Individual effective dose to the public from ²²²Rn inhalation(D_{Rn})

3 “三关键”分析结果

该项目运行所致公众最大个人年附加有效剂量出现在E方位0~0.5 m处的>12~17岁青少年组,为0.09 mSv/a,满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)、《伴生放射性矿开发利用环境辐射防护技术要求》(T/BSRS 025—2020)中公众照射剂量约束值0.3 mSv/a的要求。其中,因吸入²²²Rn所致内照射而产生的个人附加有效剂量为 7.23×10^{-2} mSv/a,贡献份额为80.6%;因吸入粉尘颗粒物而造成的伴生放射性核素内照射所致个人附加有效剂量为 1.45×10^{-3} mSv/a,贡献份额为1.6%;因食入本子区内受本项目污染的食物而造成的食入内照射为 1.59×10^{-2} mSv/a,贡献份额为17.8%。

综上,该项目关键居民组为E方位的>12~17岁青少年组,个人附加有效剂量为0.09 mSv/a,关键核素为氡,关键照射途径为氡吸入所致内照射。

食入本子区内受本项目污染食物而造成的食入内照射所致个人有效剂量估算结果见图3。可以看出,食入内照射所致公众个人有效剂量随距离增加而逐渐减少,不同年龄组之间,>12~17岁的青少年食入内照射所致公众个人有效剂量最大,>2~7岁幼儿食入内照射所致公众个人有效剂量最小;最大值出现方位与主导风向有关,出现在主导风向下风向位置。

综上,公众成员个人年附加有效剂量估算结果见图4。公众成员因本项目运行而受到的个人有效剂量随距离增加而逐渐减少(图5)。不同年龄组之间,>12~17岁的青少年因本项目运行而受到的个人有效剂量最大,与食入内照射所致公众个人有效剂量最大值年龄组一致,可侧面表明食入内照射相比吸入粉尘的贡献份额较大;最大值出现在E方位,与吸入²²²Rn所致公众个人有效剂量最大值方向一致,表明吸入²²²Rn所致公众个人有效剂量相比吸入粉尘、食入内照射的贡献份额较大。

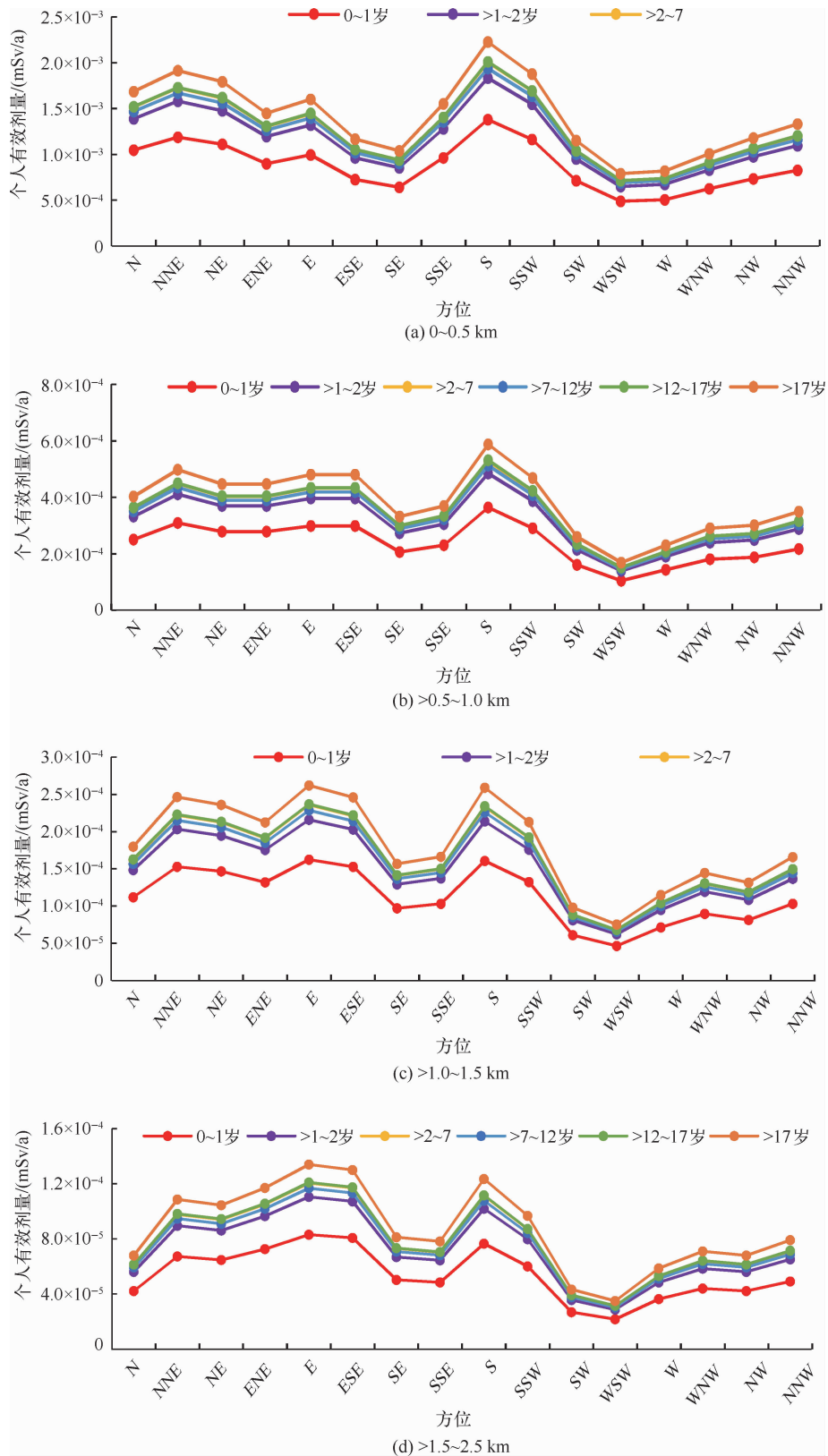
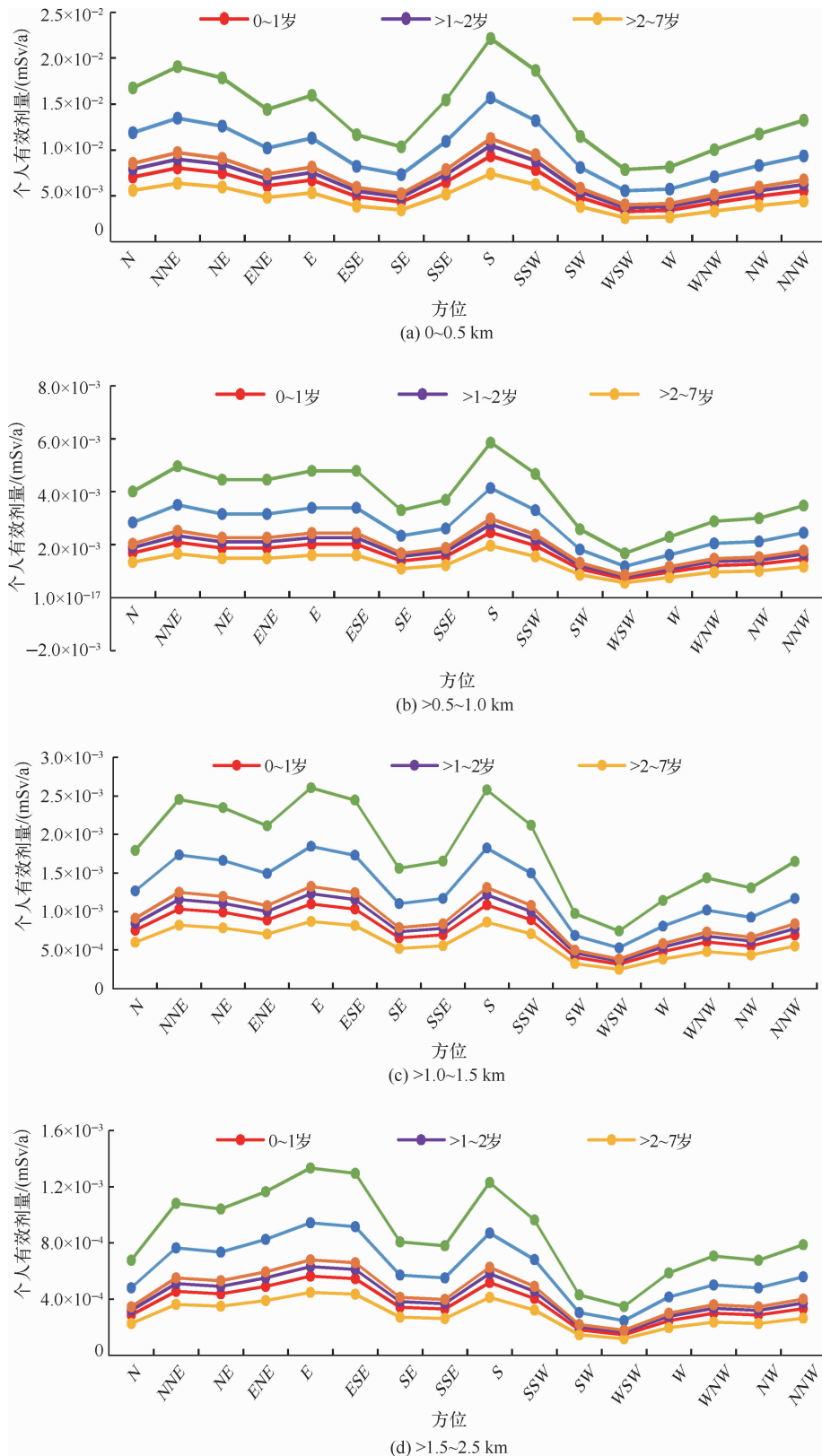


图 2 吸入粉尘所致公众个人有效剂量 (D_h)

Fig. 2 Effective personal dose for the public due to dust inhalation (D_h)

图3 食入内照射所致公众个人有效剂量(D_e)Fig. 3 Effective personal dose for the public from ingestive exposure(D_e)

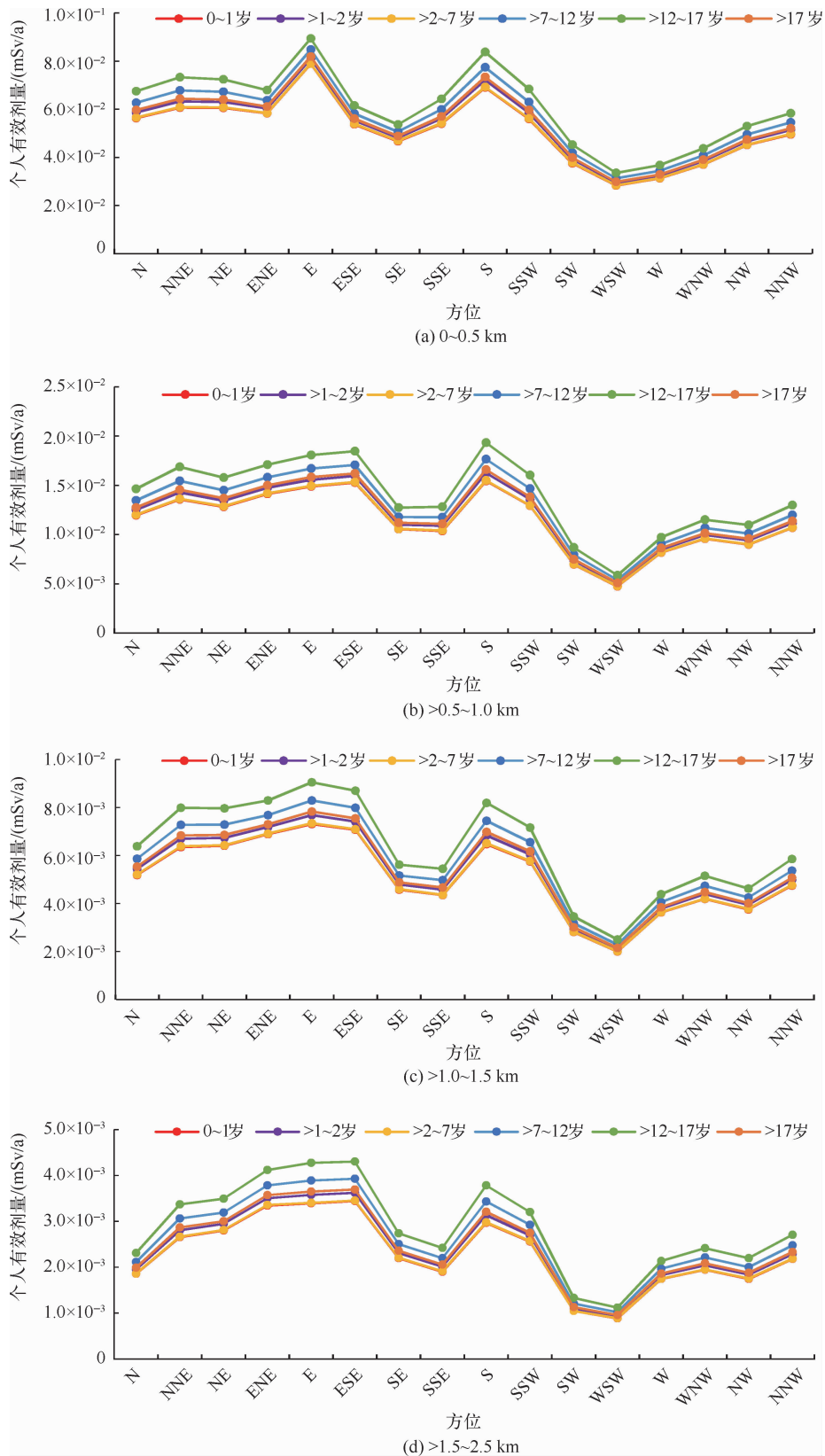


图 4 公众个人有效剂量(D)

Fig. 4 Individual effective dose for the public(D)

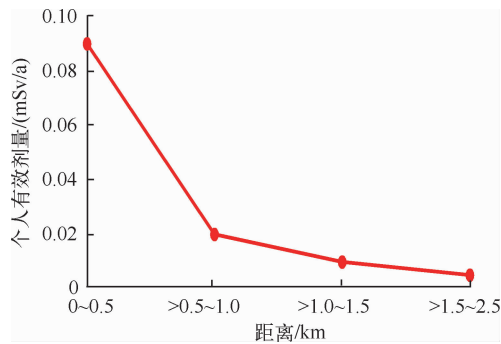


图5 公众个人有效剂量随距离变化趋势
Fig. 5 Trend of individual effective dose of the public with distance

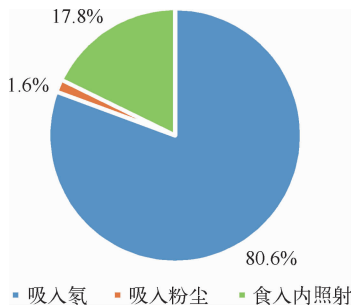


图6 公众最大个人有效剂量不同途径占比
Fig. 6 Proportion of the maximum individual effective dose of the public in different ways

4 结论

该项目的关键照射途径为氡吸入内照射,贡献份额达 80.6%;食入内照射贡献份额相对较少,为 17.8%;吸入粉尘颗粒物而造成的伴生放射性核素内照射贡献份额仅为 1.6%。在“三关键”分析时,应根据周围公众分布情况,合理确定关键居民组。

参考文献:

- [1] 自然资源部.中国矿产资源报告 2021[R/OL]. [2022-04-07]. http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/202111/P020211105382622991767.pdf.
- [2] 生态环境部,国家统计局,农业农村部.第二次全国污染源普查公报[R/OL]. (2020-06-08) [2023-02-21]. https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.
- [3] 陈春燕,李金凤,陈凌.中国伴生放射性固体废物处理处置现状分析[J].中国辐射卫生,2022,31(6):674-681.
CHEN Chunyan, LI Jinfeng, CHEN Ling. Current

situation of treatment and disposal of NORM solid waste in China [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2022, 31(6): 674-681 (in Chinese).

- [4] 王嘉莹,马奎,李玉文,等.我国部分地区煤矿原煤中天然放射性水平调查分析[J].中国辐射卫生,2022,31(4):424-427+447.
WANG Jiaying, MA Kui, LI Yuwen, et al. Natural radioactive level in raw coal of coal mines in some regions of China [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2022, 31(4): 424-427+447 (in Chinese).
- [5] 高思旂,杨春,谢树军,等.我国伴生放射性矿辐射环境监管的思考[J].核技术,2023,46(1):4-10.
GAO Siyi, YANG Chun, XIE Shujun, et al. Consideration on radiation environmental supervision of associated radioactive mines [J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(1): 4-10 (in Chinese).
- [6] 黄伊林,何贤文,冯亮亮,等.广西伴生放射性矿开发利用中的放射性水平初步调查[J].辐射防护,2020,40(4):278-285.
HUANG Yilin, HE Xianwen, FENG Liangliang, et al. Investigation for radioactivity level during the exploitation and utilization of mines associated with radioactivity in Guangxi [J]. Radiation Protection, 2020, 40(4): 278-285 (in Chinese).
- [7] 陈志东,林清,邓飞,等.广东省伴生放射性矿资源利用过程辐射水平调查[J].辐射防护通讯,2002,22(5):29-32.
CHEN Zhidong, LIN Qing, DENG Fei, et al. Investigation of radiation levels in mines associated with radioactivity in Guangdong province [J]. Radiation Protection Bulletin, 2002, 22(5): 29-32 (in Chinese).
- [8] 姜文华,张文仲,王晓涛,等.放射性气体流出物对关键人群组的有效剂量估算[J].中华放射医学与防护杂志,2015,35(10):772-774.
JIANG Wenhua, ZHANG Wenzhong, WANG Xiaotao, et al. Estimation of effective dose of radioactive gas effluents for key population groups [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(10): 772-774 (in Chinese).
- [9] KEITH F E, JEFFREY C R. External exposure to radionuclides in air, water and soil. federal guidance report No. 12. US environmental protection agency [R]. Washington DC: NRC, 1993.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.电离辐射防护与辐射源安全基本标准:GB 18871—2002[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [11] 李红,方栋.核设施正常工况气载放射性排出物后

- 果评价推荐模式的参数[J]. 辐射防护, 2003, 23(1):27-29.
- LI Hong, FANG Dong. Recommended parameters for effect assessment of radioactive airborne effluents under normal condition of nuclear facilities[J]. Radiation Protection, 2003, 23(1):27-29(in Chinese).
- [12] 环境保护部环境工程评估中心, 中国环境科学研究院, 中国环境监测总站. 环境影响评价技术导则 大气环境: HJ 2.2—2018 [S]. 中国环境出版社, 2018.
- [13] 白志鹏, 贾纯荣, 王宗爽, 等. 人体对室内外空气污染物的暴露量与潜在剂量的关系[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(6):425-428.
- BAI Zhipeng, JIA Chunrong, WANG Zongshuang, et al. Relationship of exposure and potential dose of human exposed to indoor and outdoor air pollutants [J]. Journal of Environment and Health, 2002, 19(6):425-428(in Chinese).
- [14] IAEA. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment[R]. Vienna: IAEA-19, 2001.
- [15] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2016) [Z]. 北京: 人民卫生出版社, 2016.
- [16] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022) [Z]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.

Analysis on Public Exposure Caused by a Reduced Ilmenite Project

LI Mingliang¹, CHANG Qing², JIA Libo², ZHANG Wei², CAI Pu¹

(1. Guangxi Boyu Ecological Environment Co., Ltd., Nanning 530000, China;

2. Guangxi Radiation Safety Supervision Station, Nanning 530222, China)

Abstract: According to the emission of pollutants during the operation of a reduction ilmenite (associated radioactive ore) project, the individual effective doses of different exposure routes on the surrounding public were predicted, and the contribution of different exposure routes were analyzed, to provide a reference for estimating the radiation dose of the project to the public. The results show that the maximum individual effective dose of the public members was 0.09 mSv/a, and the key exposure route was radon inhalation irradiation, which contributed 80.6%. The contribution share of ingestion exposure was 17.8%, the contribution of internal exposure due to radionuclides inhalation was 1.6%. The radiation impact of the project on the surrounding public meets the relevant standard requirements. Compared with radon inhalation exposure, the contribution of ingestion and inhalation exposure is smaller, but it cannot be ignored.

Key words: associated radioactive ore; ilmenite; public exposure; route of exposure; individual effective dose; contribution share