

青藏铁路沿线天然贯穿辐射水平调查

郑国文¹, 曲延涛², 汪传高¹, 骆志平¹, 陈凌¹

1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 新时代工程咨询有限公司, 北京 102200

摘要: **目的** 调查青藏铁路沿线天然贯穿辐射照射水平, 并初步评价该铁路从业人员及旅客所受辐射剂量。**方法** 选取青藏铁路沿线 15 个不同海拔高度的典型测量点以及拉萨到西宁的火车车厢内, 利用高气压电离室、碘化钠剂量率仪以及中子周围剂量当量率仪对天然贯穿辐射水平进行测量。**结果** 青藏铁路沿线陆地伽马辐射水平范围为 21.5 ~ 246.6 nGy/h, 宇宙射线电离成分辐射水平范围为 79.8 ~ 225.5 nGy/h, 中子辐射水平范围为 24.5 ~ 101 nSv/h; 旅客和乘务人员乘坐一次从拉萨到西宁的火车受到的天然贯穿辐射有效剂量为 4.82 μ Sv。**结论** 通过与经验公式比较以及测量方法可靠性验证, 证明了测量工作的准确性, 初步了解青藏铁路沿线的辐射水平及旅客所受辐射剂量, 可为监管部门提供依据。

关键词: 青藏铁路; 天然贯穿辐射; 宇宙射线电离成分; 中子; 陆地 γ

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2024)03-0288-05

Investigation on natural penetrating radiation along the Qinghai-Tibet Railway

ZHENG Guowen¹, QU Yantao², WANG Chuangao¹, LUO Zhiping¹, CHEN Ling¹

1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China;

2. New Era Engineering Consulting co., ltd, Beijing 102200 China

Abstract: **Objective** To investigate the natural penetrating radiation levels along the Qinghai-Tibet Railway, and to preliminarily evaluate the doses received by the railway employees and passengers. **Methods** Natural penetrating radiation was measured at 15 typical locations with different altitudes along the railway and in the carriages of a train from Lhasa to Xining using high-pressure ionization chamber RSS131, sodium iodide radiation dose rate meter MARS1561, and neutron ambient dose equivalent rate meter LB6411. **Results** The levels of terrestrial gamma radiation, cosmic ray ionization components, and neutron radiation were 21.5-246.6 nGy/h, 79.8-225.5 nGy/h, and 24.5-101 nSv/h, respectively. The effective dose of natural penetrating radiation received by passengers and crew on a train from Lhasa to Xining was 4.82 μ Sv. **Conclusion** Comparison with the empirical formula and verification of method reliability confirm the accuracy of the measurement. Our results provide a primary understanding of the radiation levels along the Qinghai-Tibet Railway and the radiation doses received by passengers, which can be used as a basis for the regulatory authorities.

Keywords: Qinghai-Tibet Railway; Natural penetrating radiation; Cosmic ray ionization component; Neutron; Terrestrial gamma radiation

天然辐射源是人类所受辐射照射的最大来源,也是联合国原子辐射效应科学委员会一直关注的问题之一^[1]。天然辐射源包括环境贯穿辐射、氡及宇生核素的内照射等。环境贯穿辐射在地球表面无处不在,是人类生存环境中的重要因素之一,包括宇宙射线电离成分、中子成分以及陆地 γ 辐射,其水平在不同地区有较大差异,是一项值得重视和清楚了解的重要环境参数^[2]。二十世纪九十年代在国家环境保护局的统

一领导下,开展了全国范围内的环境辐射水平调查,比较系统完整地回答了我国天然辐射水平的情况^[3],其结果也提交给联合国原子辐射效应科学委员会并被收录到其有关报告。近年来,随着青藏铁路的通车,大量旅客及机车乘务人员在青藏铁路沿线活动,其所受的天然贯穿辐射照射是一项值得关注的问题。此外,从职业照射的角度来看,目前有很多来自天然源的辐射照射也被划归到职业照射的范围,如航

空机组人员、部分矿山开采和矿石加工的工人以及一些在地下场所工作的人员所受到的辐射照射^[4]。对于常年在青藏铁路沿线工作的人员尤其是列车乘务人员的辐射受照水平,也是一个值得调查研究的问题。

本工作利用多重手段调查青藏铁路沿线这一地区的天然贯穿辐射水平,初步评价该地区铁路从业人员(如乘务人员)及旅客所受剂量,从而保护从业人员及旅客的身体健康,可为监管部门提供依据。

1 材料与方法

1.1 测量仪器

1.1.1 高气压电离室 采用美国通用电气公司生产的 RSS-131 型高气压电离室,对空气吸收剂量率的测量范围为 B.G.~100 mGy/h,温度范围为-25~50 ℃;校准因子为 0.965 5,扩展不确定度为 6%。

1.1.2 碘化钠剂量率仪 采用日本阿洛卡公司生产的 MAR-1561U 型碘化钠剂量率仪,对空气吸收剂

量率的测量范围为 B.G.~100 mGy/h,能量范围为 50 KeV~3 MeV,温度范围为-10~40 ℃;校准因子为 0.90,扩展不确定度为 5%。

1.1.3 中子周围剂量当量测量仪 采用德国伯托科技公司生产的 LB6411 型中子探测器,对中子周围剂量当量率的测量范围为 B.G.~100 mSv/h,温度范围为-10~50 ℃;校准因子为 1.0,扩展不确定度为 12%。

1.2 测量地点 测量总体分为 2 个阶段,第一阶段从西宁到拉萨沿途选择 15 个典型地点进行测量,由于青藏铁路整体海拔高度在 2200~5300 m,地点选取过程中充分考虑海拔因素,按照海拔每升高 500 m 选择 2~3 个测量地点的原则进行选择,具体测量点信息见表 1。第二阶段测量地点为拉萨到西宁的火车车厢内,测量结果用于评价旅客以及乘务人员所受辐射剂量,同时与室外测量结果进行比对从而验证测量方法可靠性。

表 1 第一阶段测量地点

Table 1 Locations of the first-stage measurement

序号	测量地点	海拔/m	经度(°)	纬度(°)	温度/℃	气压(100Pa)
1	西宁	2274	101	36	19.1	775.7
2	查尔汗盐湖	2680	95	36	36.5	735.5
3	格尔木	2820	94	36	28.5	721.4
4	德令哈	2943	97	37	31.8	708.0
5	青海湖	3207	99	37	27.4	690.0
6	哈儿丐乡	3278	100	37	25.0	685.1
7	拉萨	3645	91	29	19.9	654.1
8	关角山	3686	98	37	23.7	653.4
9	德庆乡	4034	90	29	20.0	628.9
10	羊八井	4302	90	30	13.0	607.6
11	沱沱河	4550	92	34	15.4	586.0
12	五道梁	4634	93	35	22.4	580.2
13	昆仑山口	4672	94	35	33.9	579.5
14	安多	4711	91	32	38.5	577.4
15	唐古拉山口	5246	91	32	16.2	540.7

1.3 测量方法 宇宙射线电离成分与陆地 γ 成分的测量采用高气压电离室与碘化钠剂量率仪相结合的方法在距离空旷地面 1 m 高度处直接测量。本工作采用的碘化钠剂量率仪对宇宙射线电离成分的响应近乎为零,所以其测量到的主要是陆地 γ 成分;高气压电离室可同时测量到宇宙射线电离

成分与陆地 γ 成分且其对宇宙射线和陆地 γ 的响应近似为 1:1,两者相减可得到宇宙射线电离成分响应值^[5-11]。中子成分的测量相对独立,测量过程中借鉴国内外相关工作中采用的技术路线^[12-15],将中子周围剂量当量率仪放置距离空旷地面 1 m 处直接测量。

2 结 果

2.1 第一阶段测量结果 测量开始之前, 高气压电离室、碘化钠剂量率仪、中子周围剂量当量率仪均预热 30 min, 每个测量点测量时间为 60 min。经测量,

15 个测量点陆地 γ 辐射水平范围为 21.5~246.6 nGy/h, 宇宙射线电离成分辐射水平范围为 79.8~225.5 nGy/h, 中子辐射水平范围为 24.5~101 nSv/h, 详细测量结果见表 2。

表 2 测量结果

Table 2 Measurement results

测量地点	陆地 γ 剂量率平均值/ (nGy/h)	相对不确定度 (%)	宇宙射线电离成分剂量率平均值/ (nGy/h)	相对不确定度 (%)	中子周围剂量当量率平均值/ (nSv/h)	相对不确定度 (%)
西宁	61.5	3.1	79.8	6.9	24.5	18.1
查尔汗盐湖	21.5	5.8	82.3	11.9	41.0	14.4
格尔木	67.1	3.5	94.1	7.5	41.0	14.4
德令哈	58.4	3.6	99.5	7.7	62.0	12.3
青海湖	62.3	3.6	109.9	7.7	59.0	12.5
哈儿巧乡	68.8	3.5	115.5	7.5	46.0	13.8
拉萨	85.2	3.2	122.3	7.1	41.0	14.4
关角山	56.3	3.4	127.7	7.4	59.0	12.5
德庆乡	148.4	3.4	131.6	7.4	55.0	12.8
羊八井	246.6	2.9	152.4	6.5	79.0	11.3
沱沱河	55.3	3.9	173.7	8.3	101.0	10.3
五道梁	49.5	4.4	174.8	9.3	97.0	10.4
昆仑山口	52.9	3.3	178.7	7.2	97.0	10.4
安多	55.8	4.4	178.0	9.3	75.0	11.4
唐古拉山口	72.9	3.2	225.5	7.0	101.0	10.3

2.2 第二阶段测量结果 第二阶段测量在从拉萨到西宁的火车车厢内进行, 测量结果用于初步评价旅客以及乘务人员所受天然贯穿辐射剂量。火车从拉萨出发前半小时将高气压电离室、碘化钠剂量率仪、中子周围剂量当量率仪进行调试及预热, 火车出发后开始测量直至火车到达西宁火车站时停止测量。期间电离室 10 s 记录一次数据, 用于计算宇宙射线电离成分和 γ 辐射所致剂量; 中子周围剂量当量率仪 10 min 记录一次数据, 用于计算中子所致剂量。

基于测量结果, 得到火车乘务人员和旅客受到的宇宙射线电离成分以及天然 γ 有效剂量为:

$$E_{\gamma+r} = 0.7 \times \sum_{n=1}^{8400} \frac{V_n}{360} = 2.55 \mu\text{Sv} \quad 1)$$

其中, n 为测量次数, 共计 8400 次, V_n 为测量值, 360 为小时和测量时间(10 s)的转换系数, 0.7 为空气吸收剂量与有效剂量转换系数。

火车乘务人员和旅客受到的中子有效剂量为:

$$E_n = \sum_{n=1}^{140} \frac{V_n}{6} = 2.27 \mu\text{Sv} \quad 2)$$

其中, n 为测量次数, 共计 140 次, V_n 为测量值, 6 为小时和测量时间(10 min)的转换系数。

综上, 旅客和乘务人员乘坐一次从拉萨到西宁(约 22 h)的火车受到的天然贯穿辐射有效剂量为 4.82 μSv 。测量过程中, A 类不确定度取标准偏差, B 类不确定度取仪器检定证书中给出的不确定度, 经计算其相对不确定度为 13%。

2.3 测量结果准确性验证 本工作通过与经验公式比较以及测量方法可靠性验证 2 个方面对本次测量工作准进行探索。

联合国原子辐射效应科学委员会给出了不同海拔高度上宇宙射线剂量率公式为:

$$D = D_0(0.21e^{-1.649h} + 0.79e^{0.4528h}) \quad 3)$$

其中, D_0 推荐值为 32 nGy/h, 公式中 h 为测量地点的海拔高度, 单位为 km^[1]。

中国原子能科学研究院岳清宇等^[16]通过对全国

各地宇宙射线电离成分的测量得到的宇宙射线剂量率与海拔高度之间的经验公式为:

$$D = D_0 \exp(7.27 \times 10^{-5} \times h^{1.184}) \quad (4)$$

其中 D_0 推荐值为 32 nGy/h, h 为测量地点的海拔高度, 单位为 m。

为验证本次测量结果的准确性, 对测量得到的不同海拔高度的宇宙射线剂量率与上述经验公式进行了比较, 结果见图 1。

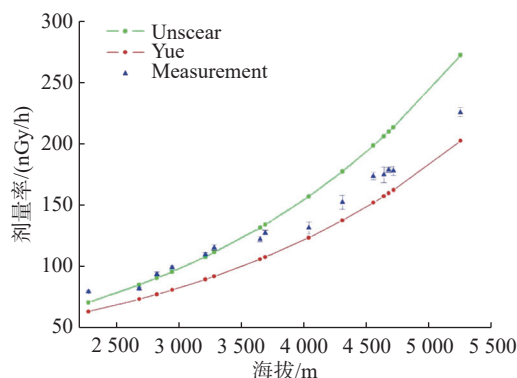


图 1 宇宙射线电离成分随海拔变化规律
Figure 1 Variation of ionizing components of cosmic rays with altitude

图 1 中绿色和红色曲线分别为联合国原子辐射效应科学委员会和中国原子能科学研究院岳清宇等^[16]给出的宇宙射线电离成分随海拔的变化规律, 蓝色散点为本次实验测量值。3 次测量结果总体比较接近, 但考虑到测量过程中的地磁纬度、气象条件、太阳活动差异等因素的存在, 各测量点的结果略有差异, 在测量的海拔高度范围内最大差异不超过 8%。

与此同时, 为验证测量的可靠性, 本工作在从拉萨到西宁的火车上选取 3 个与野外测量点对应的点位进行宇宙射线电离成分测量, 通过车厢内外测量值计算得到的屏蔽因子大致相同, 说明此次测量方法可靠性较高, 具体测量结果见表 3。

表 3 火车内与火车外测量结果比对

Table 3 Comparison of measurements inside and outside the train

测量地点	车外测量平均值/(nGy/h)	车内测量平均值/(nGy/h)	屏蔽因子(%)
安多	178.0	166.2	93.4
拉萨	122.3	114.4	93.5
羊八井	152.4	141.8	93.1

3 讨论

本工作利用高气压电离室、碘化钠剂量率仪以及

中子周围剂量当量率仪对青藏铁路沿线 15 个不同海拔高度的典型测量点以及拉萨到西宁的火车车厢内的天然贯穿辐射水平进行测量。基于室外测量结果, 得到青藏铁路沿线陆地伽马辐射水平范围为 21.5~246.6 nGy/h, 宇宙射线电离成分辐射水平范围为 79.8~225.5 nGy/h, 中子辐射水平范围为 24.5~101 nSv/h, 测量结果与其他工作相比吻合度较高^[7,17]。基于车厢内测量结果, 得到旅客和乘务人员乘坐一次从拉萨到西宁的火车受到的天然贯穿辐射有效剂量为 4.82 μ Sv, 相对不确定度为 13%。同时, 本工作从与经验公式比较以及测量方法可靠性验证 2 个方面证明了测量方法的准确性, 测量结果可用于初步评价该地区铁路从业人员(如乘务人员)及旅客所受剂量, 为监管部门提供依据。

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 郑国文负责测量方法建立、实地测量、数据分析以及论文撰写; 汪传高负责参与现场测量及结果分析; 曲延涛、骆志平、陈凌负责技术指导、论文修改完善

参考文献

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation[R]. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000.
- [2] Bouville A, Lowder WM. Human population exposure to cosmic radiation[J]. *Radiat Prot Dosim*, 1988, 24(1/4): 293-299. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a080290.
- [3] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国环境天然贯穿辐射水平调查研究(1983—1990年)[J]. *辐射防护*, 1992, 12(2): 96-121.
The Writing Group of the Summary Report on Nationwide Survey of Environmental Radioactivity Level in China. Survey of environmental natural penetrating radiation level in China (1983-1990)[J]. *Radiat Prot*, 1992, 12(2): 96-121.
- [4] 刘建忠, 靳根. 空勤人员辐射剂量的估算与测定[J]. *辐射防护通讯*, 2006, 26(5): 23-27. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2006.05.005.
Liu JZ, Jin G. Estimation and determination of radiation doses to air crew[J]. *Radiat Prot Bull*, 2006, 26(5): 23-27. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2006.05.005.
- [5] 张林, 张静波, 谭汉云, 等. 广州市天然辐射所致公众照射剂量的评价[J]. *中国辐射卫生*, 2011, 20(1): 79-80. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2011.01.040.
Zhang L, Zhang JB, Tan HY, et al. The evaluation of the natural

- radiation level and dose of population in Guangzhou[J]. *Chin J Radiol Health*, 2011, 20(1): 79-80. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2011.01.040](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2011.01.040).
- [6] 韩志滨, 马宏伟, 杜广仁. 大连市地区地表天然放射性水平调查[J]. *地质与资源*, 2020, 29(5): 483-489. DOI: [10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.05.011](https://doi.org/10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.05.011).
- Han ZB, Ma HW, Du GR. Investigation on the natural radioactivity level of ground surface in Dalian urban area[J]. *Geol Resour*, 2020, 29(5): 483-489. DOI: [10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.05.011](https://doi.org/10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.05.011).
- [7] 姚可, 秦汉云, 倪士英, 等. 西藏自治区环境天然贯穿辐射水平调查研究[J]. *辐射防护*, 1994, 14(4): 267-275.
- Yao K, Qin HY, Ni SY, et al. Investigation of environmental natural penetrating radiation level in the Tibet autonomous region[J]. *Radiat Prot*, 1994, 14(4): 267-275.
- [8] 郭立本, 胡晓林, 程丰民, 等. 青海省环境天然贯穿辐射水平调查研究[J]. *辐射防护*, 1994, 14(6): 451-458.
- Guo LB, Hu XL, Cheng FM, et al. Investigation of environmental natural penetrating radiation level in Qinghai province[J]. *Radiat Prot*, 1994, 14(6): 451-458.
- [9] Zanini A, Storini M, Saavedra O. Cosmic rays at high mountain observatories[J]. *Adv Space Res*, 2009, 44(10): 1160-1165. DOI: [10.1016/j.asr.2008.10.039](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.039).
- [10] Taylor GC, Ojeh CA. Measurement and calculation of cosmic radiation exposure during a pole-to-pole flight sequence[J]. *Radiat Meas*, 2010, 45(10): 1589-1592. DOI: [10.1016/j.radmeas.2010.07.009](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.07.009).
- [11] 齐晨阳, 张巍, 张显鹏, 等. 石岛湾核电站周边地表 γ 辐射水平调查及影响因素研究[J]. *中国辐射卫生*, 2023, 32(1): 15-20. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.004](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.004).
- Qi CY, Zhang W, Zhang XP, et al. Terrestrial gamma radiation level around Shidaowan nuclear power plant, China and influencing factors[J]. *Chin J Radiol Health*, 2023, 32(1): 15-20. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.004](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.004).
- [12] Naher K, Ikeda N, Fukuda H, et al. Terrestrial neutrons in West Zone II building on Ito campus[J]. *Mem Fac Eng Kyushu Univ*, 2009, 69(1): 15-24.
- [13] Burgkhardt B, Fieg G, Klett A, et al. The neutron fluence and $H^*(10)$ response of the new LB 6411 REM counter[J]. *Radiat Prot Dosim*, 1997, 70(1/4): 361-364.
- [14] 徐勇军, 刘森林, 吴建华, 等. 西藏自治区天然中子周围剂量当量率的测量[J]. *辐射防护*, 2014, 34(5): 319-323.
- Xu YJ, Liu SL, Wu JH, et al. Measurement of natural neutron ambient dose equivalent rate in Tibet autonomous region[J]. *Radiat Prot*, 2014, 34(5): 319-323.
- [15] 吴建华, 徐勇军, 刘森林, 等. 西藏地区天然中子能谱测量[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(2): 219-222. DOI: [10.7538/yzk.2014.48.02.0219](https://doi.org/10.7538/yzk.2014.48.02.0219).
- Wu JH, Xu YJ, Liu SL, et al. Spectrum measurement of natural neutron in Tibet[J]. *Atomic Energy Sci Technol*, 2014, 48(2): 219-222. DOI: [10.7538/yzk.2014.48.02.0219](https://doi.org/10.7538/yzk.2014.48.02.0219).
- [16] 岳清宇, 金花. 低大气层中宇宙射线电离量的分布测量[J]. *中国核科技报告*, 1988(S2): 453-464.
- Yue QY, Jin H. Measurement of ionization distribution in the lower atmosphere caused by cosmic-ray[J]. *China Nucl Sci Technol Report*, 1988(S2): 453-464.
- [17] 陈然, 徐勇军, 吴建华, 等. 西藏地区天然中子所致居民剂量初步评价[J]. *中国辐射卫生*, 2017, 26(6): 630-632. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.06.003](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.06.003).
- Chen R, Xu YJ, Wu JH, et al. Natural neutron effective dose assessment to the residents in Tibet[J]. *Chin J Radiol Health*, 2017, 26(6): 630-632. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.06.003](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.06.003).

(收稿日期:2023-12-02)