

某深埋输水隧洞放射性环境地质调查与评价

李刚¹, 周剑¹, 李盛富¹, 刘刚¹, 姬永尚²

1. 核工业二一六大队, 新疆 乌鲁木齐 830011

2. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830091

摘要:为探究某深埋输水隧洞穿越地层的放射性环境质量,采用原位测试和样品分析等手段,研究隧洞施工期的不利因素。结果表明:隧洞地表沿线的放射性元素含量在背景值变化范围内,未发现放射性异常现象。隧洞穿越的7个钻孔内 γ 总量和地温测井的结果表明:孔内核素放射性水平较低,基本处于豁免水平,但地温存在异常区域,施工期务必引起重视。钻孔目的层的岩心放射性核素活度浓度低,属于豁免范围内,孔内地下水放射性水平低,满足Ⅲ类地下水要求。辐射防护的计算结果显示,隧洞段地表沿线 γ 有效剂量当量为0.15 mSv/年,符合国家要求。隧洞段内照射指数和等效镭浓度符合约束值,ZK16钻孔的目的层外照射指数略高于标准值。因此,地下隧洞在施工期需着重关注洞内放射性水平,在辐射异常地段加强岩石采样与分析工作,以保证施工安全。

关键词:输水隧洞;地面伽玛能谱;测井;放射性环境质量;照射指数;等效镭浓度

中图分类号:X837 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-6002(2024)03-0253-07

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2024.03.25

Geological Investigation and Evaluation of Radioactive Environmental in a Deep-Buried Water Transfer Tunnel

LI Gang¹, ZHOU Jian¹, LI Shengfu¹, LIU Gang¹, JI Yongshang²

1. No. 216 Geological Party, China National Nuclear Corporation, Urumqi 830011, China

2. Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute of Xinjiang, Urumqi 830091, China

Abstract:In order to explore the radioactive environmental quality of a deep-buried water transfer tunnel, the unfavorable factors during tunnel construction are identified by in-situ testing and sample analysis. The content of radioactive elements along the tunnel surface is within the range of background values, and no radioactive anomalies are found. In seven boreholes where the tunnel crosses the results of γ total amount and ground temperature logging show that the radioactivity level in the hole is low and basically at the exemption level, but there are abnormal areas in the ground temperature, so attention must be paid during the construction period. The activity concentration of radionuclides in the core at the target layer of the borehole is low, which falls within the scope of exempted activity concentration, and the radioactivity level of groundwater in the hole is low, meet the requirements of third types groundwater. The calculation results of radiation protection show that along the surface of the tunnel section the effective dose equivalent of γ is 0.15 mSv/a, accord with the national requirements. The internal exposure index and radium equivalent activity in the tunnel section which conform to the constraint value, the external exposure index at the target layer of borehole ZK16 is slightly higher than the standard value. Therefore, during the construction of the underground tunnel, it is necessary to pay attention to the radioactive level in the tunnel, and strengthen the sampling and analysis of rock samples in the section with abnormal radiation to ensure the construction safety.

Keywords:water transfer tunnel; ground gamma spectrum; logging; radioactive environmental quality; exposure index; the radium equivalent activity

某地下输水隧洞管线长达数十公里,工程处于地质勘查阶段。为进一步探明输水管线穿越区域的地质情况,在施工期规避不利的地质条件,对可能出现的工程地质、环境地质等潜在问题进行分析预测,对输水管线穿越的地表和地下条带状

区域内的岩土、水体等环境因素放射性水平进行调查和评价是非常必要的。笔者对管线穿越典型地层单元的地面伽玛能谱和钻孔内代表性样品开展分析测试等工作,评估输水隧洞的放射性环境质量,可为提高长距离输水管线的工程质量,以及

收稿日期:2022-10-11;修订日期:2023-03-26

第一作者简介:李刚(1993-),男,新疆伊犁人,硕士,工程师。

通讯作者:李盛富

确保施工期的作业安全提供参考。

1 研究区概况和工作方法

1.1 地质背景

研究区内输水管线地质剖面示意如图1所示。管线主要穿越元古界、古生界、中生界和新生界地层。地层由老至新为元古界-木札尔特岩群(Pt_1M ,岩性大致为花岗片麻岩、黑云斜长片麻岩);古生界-上志留统科克铁克达坂岩组

(S_3k ,岩性为云母片岩、云母石英片岩夹大理岩、灰岩);二叠系-下二叠统小提坎里克组(P_1x ,岩性主要为灰白色花岗斑岩夹霏细斑岩);中生界-侏罗系和白垩系($J、K$,岩性主要为砾岩、砂砾岩、泥岩等);新生界-第四系(Q ,岩性主要为第四系残、坡积物)。输水隧洞穿越盆地,该盆地呈东西向椭圆形分布,由西向东,由南、北向中部呈 $1/60\sim 1/100$ 坡度倾斜,盆地内部的地貌特征可划分为山地、丘陵、平原、沟壑。

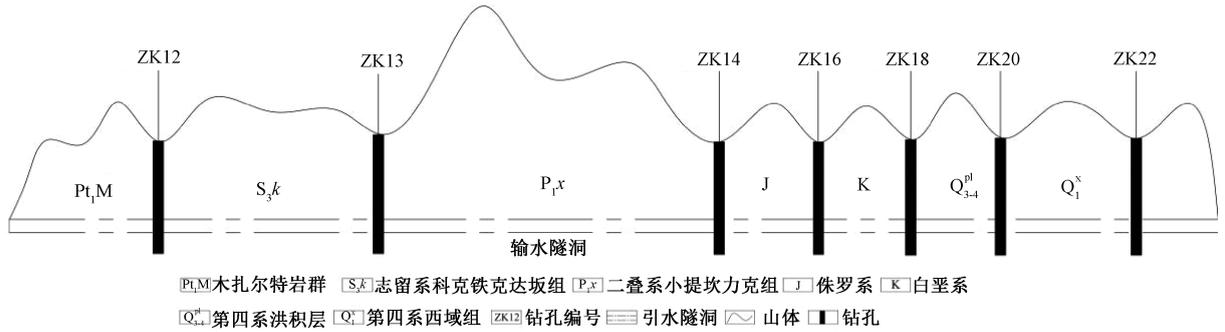


图1 输水管线地质剖面示意

Fig. 1 Geological profile of water diversion pipeline

1.2 工作方法

以现场原位测试和样品室内分析为主。原位测试所用仪器设备均经过校准,且在有效期内,工作前后均进行仪器稳定性核查。主要工作内容包括:①输水隧洞段开展地面伽玛能谱测量,以查明隧洞沿线放射性核素含量水平,所用仪器为FD-3022-I型四道伽玛能谱仪(上海申核),依据《地面伽玛能谱测量规范》(EJ/T 363—1998)开展地面测量工作(工作比例尺为 $1:2000$);②钻孔内部放射性 γ 总量测井,所用仪器为FD-3019型 γ 闪烁测井仪,依据《 γ 测井规范》(EJ/T 611—2003),自下而上连续测井;③钻孔地温测井,所用仪器为JHQ-2D测井仪(上海地学仪器研究所),执行《地浸砂岩型铀矿地球物理测井规范》(EJ/T 1162—2002),按规范要求定期检查仪器刻度,地温测井采用简易测温方式,测量范围自钻井液面至孔底,与孔底距离不大于 10 m ,自上而下连续测井;④钻孔内代表性样品分析,针对输水隧洞目的层中部的岩心样和以钻孔内地下水为代表的放射性样品,开展放射性核素含量的实验室测试工作。在三维空间内的监测和采样,大体可涵盖输水隧洞穿越地层

的岩性,可初步获得隧洞段地面和地下放射性核素的空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 地面伽玛能谱测量

隧洞段的地面伽玛能谱测量能够反映设计路线的地表放射性核素含量及分布规律,其目的是评价沿线放射性环境质量。由于隧洞所穿越的地层单元不同,对沿线的露头、风化面、堆积物等,共计7条能谱剖面进行测量。各地层中铀(U)、钍(Th)、钾(K)核素含量的统计结果见表1。由表1可见,各剖面U含量的均值分布范围为 $2.52\times 10^{-6}\sim 4.53\times 10^{-6}\text{ g/g}$,Th含量的均值分布范围为 $8.63\times 10^{-6}\sim 16.62\times 10^{-6}\text{ g/g}$,K含量的均值分布范围较窄,为 $1.83\%\sim 2.88\%$ 。U、Th的放射性强度在上志留统科克铁克达坂岩组(S_3k)和侏罗系(J)地层中较高,第四系(Q)地层中U和K的含量均值相对偏低,下二叠统小提坎里克组(P_1x)和白垩系(K)地层的Th含量与其他地层相比较低,平均值分别为 8.63×10^{-6} 、 $8.68\times 10^{-6}\text{ g/g}$ 。

表 1 输水隧洞段地表放射性伽玛能谱平均值统计
Table 1 Gamma spectrum of surface radioactive in intake tunnel

地层代号	U/ 10^{-6} (g/g)		Th/ 10^{-6} (g/g)		K/%	
	测值区间	平均值	测值区间	平均值	测值区间	平均值
Pt ₁ M	0.45~4.97	2.95	4.08~16.57	10.84	1.35~3.30	2.83
S ₃ k	1.35~7.73	4.53	10.05~26.69	16.62	1.84~5.11	2.59
P ₁ x	1.16~5.15	3.15	4.79~12.73	8.63	1.09~2.56	2.02
J	2.13~6.73	4.52	9.04~16.56	12.17	2.41~3.49	2.88
K	0.82~5.47	2.69	5.56~13.26	8.68	1.02~2.30	1.96
Q ₃₋₄ ^{pl}	0.46~5.38	2.78	4.54~18.96	9.85	1.19~2.82	1.83
Q ₁ ^s	1.01~4.53	2.52	4.87~16.05	10.01	1.25~3.38	2.03

隧洞段地面伽玛能谱强度的变化曲线如图 2 所示,隧洞所穿越的地层地表岩石放射性强度变化不大,U 含量的分布范围为 $0.45 \times 10^{-6} \sim 7.73 \times 10^{-6}$ g/g, Th 含量的分布范围为 $4.08 \times 10^{-6} \sim 26.69 \times 10^{-6}$ g/g, K 含量的分布范围为 1.02% ~ 5.11%。隧洞全线地表 U、Th、K 含量的平均值分别为 3.60×10^{-6} 、 12.91×10^{-6} g/g 和 2.32%。根据中国自然带中土壤(母质)放射性元素含量统计^[1]可知,在年平均气温为 4℃~13℃,年均降水量为 150~800 mm 的气候条件下,母质中 U、Th、K 的核素含量分别为 2.61×10^{-6} 、 11.70×10^{-6} g/g 和 2.17%。在此基础上,结合《铀矿地质勘查成果分类分级》(EJ/T 1213—2018)^[2]中关于放射性异常划分标准的规定,原则上采用 3 倍背景值作为放射性异常的阈值下限。因此,隧洞段地表沿线的 U、Th、K 元素含量均在背景值变化范围内,未发现放射性异常现象。

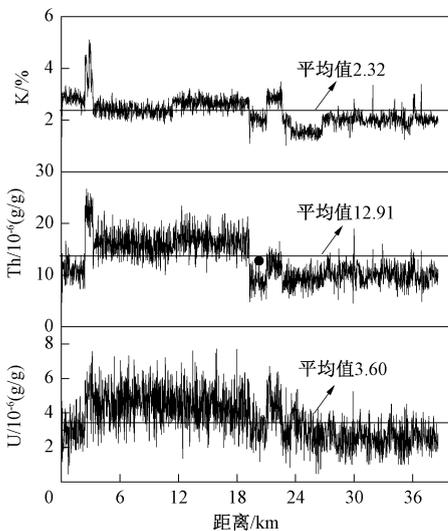


图 2 隧洞段地面伽玛能谱强度变化曲线
Fig. 2 Strength change of ground gamma spectrum in intake tunnel

2.2 钻孔 γ 总量测井

研究区内 7 个钻孔的 γ 总量测井结果如表 2

所示。全孔 γ 辐射剂量率分布范围为 4.0 ~ 466.8 nGy/h,平均值为 87.5 ~ 184.3 nGy/h。其中 ZK13 号孔的全孔 γ 辐射剂量率均值最低 (87.5 nGy/h);ZK16 号孔 γ 辐射总量最大值为 466.8 nGy/h,平均值为 164.8 nGy/h。根据《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》(GB 27742—2011)^[3]附录 B.1 中天然放射性核素免管浓度值为 1Bq/g(约 460 nGy/h)的要求,隧洞段各钻孔岩石 γ 辐射剂量率总体呈现较低的水平,仅 ZK16 号孔的测量值略高出豁免浓度限值。 γ 总量测井的结果表明:隧洞段穿越的 7 个钻孔内核素放射性水平较低,基本处于免于辐射防护的豁免范围内,放射性的局部偏高可能是由自然界中 U 含量本底偏高的岩石所引起的。

表 2 钻孔 γ 总量测井结果
Table 2 The result of γ gross logging in drilling

钻孔编号	全孔 γ 辐射剂量率/(nGy/h)		
	最小值	最大值	平均值
ZK12	4.0	386.1	96.3
ZK13	7.8	193.0	87.5
ZK14	8.6	434.7	184.3
ZK16	12.2	466.8	164.8
ZK18	16.2	346.1	116.4
ZK20	8.1	217.2	87.6
ZK22	8.2	217.2	94.4

2.3 钻孔地温测井

根据地温测井结果(图 3),隧洞段各钻孔纵向 100 ~ 150 m 以上为变温层,120 ~ 180 m 为恒温层,150 m 以下为增温层。随深度增加,地温逐渐升高,除 ZK12 外,其余钻孔地温梯度为 1.99 ~ 3.16℃/100 m,属正常地温梯度。7 个钻孔的孔底地温范围为 20.59℃~33.53℃,ZK12 和 ZK14 的孔底地温超过 31℃,分别为 32.04℃和 33.53℃;ZK13 和 ZK16 的孔底地温分别为 28.25℃、28.65℃。结合《水利水电工程施工组

织设计规范》(SL 303—2017)^[4]的相关规定,洞室内平均温度不应超过 28℃。因此,在输水隧洞的掘进过程中穿越上述 4 个钻孔时,务必按照设计施工规范采取相应的降温手段和必要的安全防护措施。考虑到该次地温测井为简易地温测量,所测数据与实际地温存在一定偏差,未来隧洞施工过程中,对地温异常的隧洞段应开展地温监测,高地温段采取必要的措施(加强送风等)降低隧洞温度,保障施工人员身体健康。

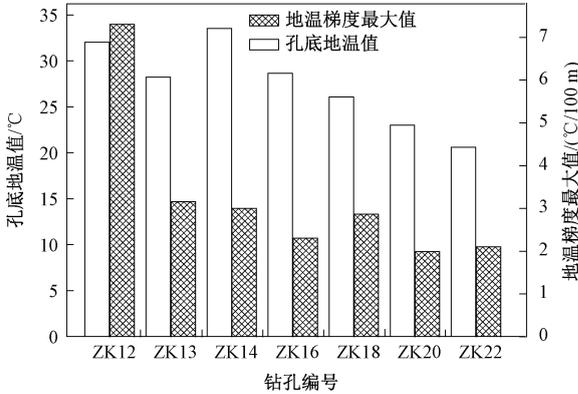


图3 钻孔地温测井结果

Fig. 3 The result of γ gross logging in drilling

2.4 岩心放射性核素含量分析

为进一步明确隧洞段岩石样品的放射性水平及分布特征,对 7 个钻孔目的层深度的岩心样品核素含量进行分析(图 4)。岩心中²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K 活度浓度范围分别为 63.5~149.3、44.1~131.5、38.8~120.7、580.4~1398.0 Bq/kg。ZK13 号孔 4 种核素的放射性含量均较低,岩石放射性强度也较低,ZK12 的²³⁸U 含量最高,ZK14 和 ZK16 号孔的核素含量均相对较高,表明岩石的放射性强度高,这与 γ 总量测井的结果一致。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)^[5]表 A1 中放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度的要求,²³⁸U、²²⁶Ra 的豁免活度浓度为 10 Bq/g,²³²Th

为 1 Bq/g, K 为 100 Bq/g,因此,工作区内岩心²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K 的活度浓度值均属于豁免范围内。

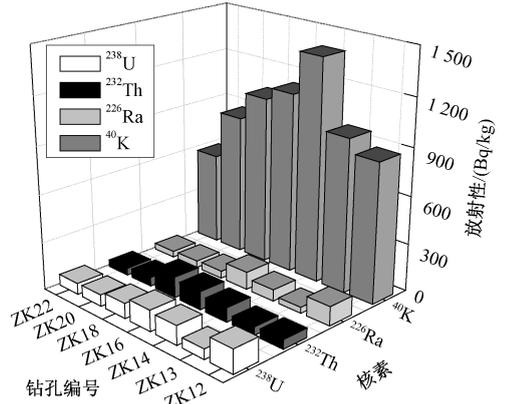


图4 钻孔目的层岩心样品放射性核素含量

Fig. 4 Core radionuclide content of target horizon in drilling

2.5 水样核素与总放射性分析

研究区内地层整体渗透性较差,水体主要为地下裂隙水,其迁移搬运能力也相对较差。输水隧洞所穿越的 7 个钻孔地下水样品核素分析结果如表 3 所示。水样中 U、Ra、氡的含量分布范围分别为 0.78~10.19 $\mu\text{g/L}$ 、0.002~0.011 Bq/L、17.02~33.05 Bq/L, Th 含量最大值为 0.33 $\mu\text{g/L}$,出现在 ZK18 号孔。7 个地下水样品的总放射性水平均较低,总 α 最大值为 0.365 Bq/L(ZK22),总 β 最大值为 0.614 Bq/L(ZK18)。依据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[6]表 1 中地下水质量常规指标及限值要求,钻孔 ZK12、ZK16、ZK18 的地下水总 $\alpha \leq 0.1$ Bq/L,总 $\beta \leq 1.0$ Bq/L,放射性强度满足地下水质量分类及指标中的 II 类水要求(水质适用于各种用途),其余 4 个钻孔的地下水总 $\alpha \leq 0.5$ Bq/L,总 $\beta \leq 1.0$ Bq/L,放射性强度符合 III 类水要求(适用于集中生活饮用水水源及工农业用水),表明输水隧洞所穿越钻孔的地下水放射性水平低。

表3 水样核素与总放射性分析

Table 3 Analysis of nuclides and gross radioactivity of water in drilling

钻孔编号	分析项目					
	U/($\mu\text{g/L}$)	Th/($\mu\text{g/L}$)	Ra/(Bq/L)	氡/(Bq/L)	总 α /(Bq/L)	总 β /(Bq/L)
ZK12	1.72	<0.05	0.009	18.00	0.020	0.024
ZK13	10.19	<0.05	0.005	25.00	0.127	0.201
ZK14	0.78	<0.05	0.008	28.00	0.145	0.354
ZK16	7.30	0.05	0.004	33.05	0.017	0.604
ZK18	0.88	0.33	0.011	21.32	0.024	0.614
ZK20	1.39	0.05	0.005	22.67	0.193	0.492
ZK22	1.98	<0.05	0.002	17.02	0.365	0.299

3 放射性环境质量评价

3.1 隧洞放射性环境质量

隧洞输水作为水利工程上一种大尺度、跨流域的调水手段,在协调水资源综合利用,保障区域用水等方面意义重大。笔者研究发现,隧洞段地面沿线的 U、Th 放射性水平在科克铁克达坂岩组(S_3k)和侏罗系(J)地层中相对较高,放射性元素的含量在背景值变化范围内,未发现放射性异常。钻孔测井结果则显示,天然铀在岩石中分布不均衡,导致局部放射性水平偏高,放射性水平总体上满足免于辐射防护的豁免要求。但 ZK12、ZK13、ZK14 和 ZK16 的孔底地温超过 $28\text{ }^\circ\text{C}$,依据《水利水电工程施工组织设计规范》(SL 303—2017)的相关要求,在施工过程中必须加强隧洞送风和降温工作。此外,岩心和地下水的放射性核素含量均未出现明显增高,岩心的放射性核素活度浓度属于豁免范围内,且地下水能够达到Ⅲ类水要求。

3.2 施工期地表 γ 有效剂量当量估算

为进一步明确隧洞段地表 γ 辐射在人员施工作业时产生的有效剂量当量,根据多通道伽玛能谱仪测试结果,对隧洞段地表高度为 1 m 处的 γ 空气吸收剂量进行计算,用以评价环境空气中 γ 的辐射水平。利用三成分法^[7-8],借助能谱仪测试结果中的 U、Th、K 放射性核素含量,估算 γ 吸收剂量率,公式如下。

$$H_e = D_r \times K \times T \quad (1)$$

$$D_r = k_U \times A_U + k_{Th} \times A_{Th} + k_K \times A_K \quad (2)$$

式中: H_e 为距地高度 1 m 处的 γ 有效剂量当量, mSv ; K 为有效剂量当量率与空气吸收剂量率的比值,取 $0.7^{[9]}$; T 为接触时间, h 。 D_r 为距地高度 1 m 处的 γ 空气吸收剂量率, nGy/h ; A_U 、 A_{Th} 、 A_K 为 U、Th、K 的放射性活度浓度, Bq/kg ; k_U 、 k_{Th} 、 k_K 为换算系数(分别取 0.427 、 0.662 、 0.043)^[10-11]。

由于能谱仪测试结果的数量级和单位为 10^{-6} g/g 或%,需要将其换算为 Bq/kg ,公式如下。

$$1 \times 10^{-6}\text{ eU}(\text{g/t}) = 12.35 \text{ Bq/kg} \quad (3)$$

$$1 \times 10^{-6}\text{ eTh}(\text{g/t}) = 4.06 \text{ Bq/kg} \quad (4)$$

$$1\%(K) = 313 \text{ Bq/kg} \quad (5)$$

取各地层 U、Th、K 测量结果平均值的最大值进行计算,代入可得:

$$D_r = 0.427 \times (4.53 \times 12.35) + 0.662 \times$$

$$(16.62 \times 4.06) + 0.043 \times$$

$$(2.88 \times 313) = 106.37 \text{ nGy/h}$$

接触时间按照每人每天工作 8 h ,一年 260 个工作日计算,可得隧洞沿线伽玛辐射对人体产生的有效剂量当量为 $H_e = 106.37 \times 0.7 \times 8 \times 260 \times 10^{-6} = 0.15 \text{ mSv/a}$

综上,隧洞段地表沿线地面高度 1 m 处的 γ 有效剂量当量为 0.15 mSv/年 ,根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)中关于剂量限值控制水平的规定(所受到的平均剂量估计值不应超过 1 mSv/年)可知,施工期输水隧洞所穿越的地层在地表产生的 γ 辐射强度较低,符合国家要求。

3.3 施工期隧洞内放射性核素评价

开展地下输水隧洞掘进时,工作人员在破碎、搬运等工艺操作过程中会不可避免地吸入岩尘。为进一步做好辐射防护工作,需由隧洞所穿越地层的放射性活度浓度计算出内照射指数和外照射指数,进而衡量隧洞掘进过程中岩尘对人体产生的不利影响。考虑到岩石中放射性核素分布具有非均衡性,且放射性核素的危险指数广泛采用等效镭浓度(Ra_{eq})进行评价,因此用 Ra_{eq} 来衡量输水隧洞掘进过程中的辐射暴露强度,计算公式^[12-13]如下。

$$I_{Ra} = \frac{C_{Ra}}{A_{Ra}} \quad (6)$$

$$I_r = \frac{C_{Ra}}{S_{Ra}} + \frac{C_{Th}}{S_{Th}} + \frac{C_K}{S_K} \quad (7)$$

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43C_{Th} + 0.07C_K \quad (8)$$

式中: I_{Ra} 为内照射指数, I_r 为外照射指数,无量纲; A_{Ra} 为内照射下,天然放射性核素 ^{226}Ra 的放射性活度浓度,依据规范取值为 200 Bq/kg ; C_i 为放射性核素的活度浓度, Bq/kg ; S_i 为外照射下,放射性核素独立存在时的标准限量 ($S_{Ra} = 370$, $S_{Th} = 260$, $S_K = 4\ 200$), Bq/kg ; Ra_{eq} 为等效镭浓度, Bq/kg 。

将 7 个钻孔内代表性样品的放射性活度浓度代入计算,结果如图 5 所示。所有样品中外照射指数的分布范围为 $0.41 \sim 1.01$,内照射指数分布范围为 $0.22 \sim 0.66$, Ra_{eq} 分布范围为 $140 \sim 354 \text{ Bq/kg}$,照射指数与 Ra_{eq} 表现出一定的“协同性”。ZK22 的照射指数与 Ra_{eq} 均为最低,分别为 0.22 (内)、 0.41 (外)和 140 Bq/kg ; ZK18 内照射指数最大,达到 0.66 。需重点注意的是, ZK16 外照射

指数为 1.01,且 Ra_{eq} 达到 354 Bq/kg,为所有岩心样品中最高。现阶段国内外对于岩石天然放射性核素照射指数和 Ra_{eq} 阈值的研究资料较少,已有研究建议将 Ra_{eq} 最大容许值定为 370 Bq/kg^[14]。结合《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566—2010)对建筑材料照射指数方面的规定(天然放射性核素的放射性比活度应同时满足 $I_{Ra} \leq 1.0$ 和 $I_r \leq 1.0$),隧洞段所穿越的钻孔(除 ZK16 外)内照射指数和 Ra_{eq} 均在安全辐射范围内,仅 ZK16 的外照射指数略高于阈值。因此,在输水隧洞的掘进过程中工作人员务必做好辐射防护,确保施工安全。

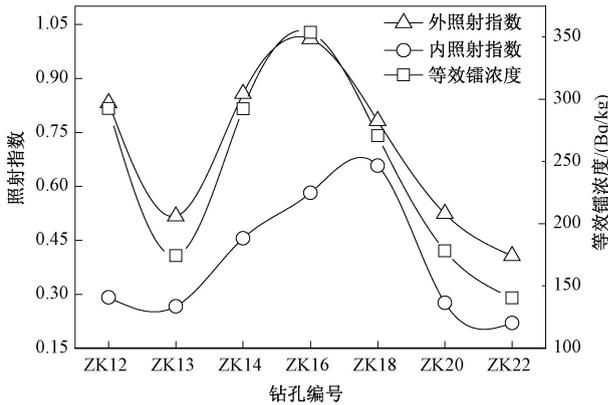


图5 照射指数及 Ra_{eq} 计算结果

Fig. 5 The calculation results of exposure index and radium equivalent activity

3.4 相关性分析与防护建议

输水隧洞共计穿越 7 个地层,其中 ZK16 号钻孔所在地层为侏罗系(J),该地层下地表放射性伽玛能谱水平偏高,U 含量达 4.52×10^{-6} g/g,表明该地层岩石的放射性元素含量较高,这由 ZK16 的放射性测井得到验证,其 γ 总量平均值为 164.8 nGy/h。考虑到 ZK16 号孔外照射指数为 1.01(大于 1.0),根据《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566—2010)中关于建筑主体材料放射性核素的要求,ZK16 号钻孔处的天然原料不能用于隧洞工程的主体结构。此外,地下水流场特征及不同的迁移过程可能是导致地层构造中放射性元素含量不同的原因^[15]。且含放射性元素的地下水在迁移和转化过程中,不断冲刷基岩并携带基岩裂隙中的放射性元素一起运动,使局部地下水放射性水平偏高^[16],从而对隧洞施工期的放射性环境质量安全构成威胁。因此,隧洞在穿越 ZK16 所在地层时,应加强对该地段的地下水、岩

石和空气的取样分析,进一步明确 U、Th 高值区,以便采取防护、隔离等措施。同时对放射性高的地段进行元素分析,以确定放射性核素的浸出率,进而评价放射性核素可能引起的污染程度,保障施工安全。

4 结论

通过开展输水隧洞地表和地下原位测试、代表性样品分析等工作,初步探讨了输水隧洞施工期放射性环境质量。隧洞段穿越的地层地表沿线核素含量在背景值变化范围内,未发现明显的放射性异常区域。 γ 有效剂量当量为 0.15 mSv/年,辐射强度较低,符合国家要求。隧洞所穿越的 7 个钻孔,孔内 γ 总量属于免于辐射防护水平。但地温测井则显示隧洞穿越了地温异常区域,后续的岩土施工中务必进行地温异常监测,并加强隧洞内通风。隧洞段代表性样品的分析结果表明:岩石放射性核素的活度浓度属于豁免范围内,钻孔内地下水的放射性含量满足 III 类地下水要求。隧洞穿越 ZK16 钻孔时,需重点注意岩石产生的外照射作用,建议在施工期间,加强这一地段地下水、岩石、空气等样品的采样与分析工作。

参考文献 (References):

- [1] 张钟先,田均良.黄土区土壤中天然放射性元素背景值研究[J].中国环境科学,1993,13(4):288-292.
ZHANG Zhongxian, TIAN Junliang. Study on Background Values of Natural Radionuclides in Soil on Loess Region[J]. China Environmental Science, 1993, 13(4): 288-292.
- [2] 核工业标准化研究所.铀矿地质勘查成果分类分级:EJ/T 1213—2018[S].北京:核工业标准化研究所,2018.
- [3] 核工业标准化研究所.可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度:GB 27742—2011[S].北京:中国标准质检出版社,2011.
- [4] 水利部水电水利规划设计总院.水利水电工程施工组织设计规范:SL 303—2017[S].北京:中国水利水电出版社,2017.
- [5] 核工业标准化研究所.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,2002.
- [6] 全国国土资源标准化技术委员会.地下水质量标准:GB/T 14848—2017[S].北京:中国环境科学

- 出版社,2017.
- [7] 程业勋,王南萍,侯胜利.核辐射场与放射性勘查[M].1版.北京:地质出版社,2005.
- [8] BECK H L,DECAMPO J,GOGOLAK C. In Situ Ge (Li) and Nai (TI) Gamma-Ray Spectrometry [R]. New York:United States Atomic Energy Commission, 1972.
- [9] European Commission. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials [R]. Brussels: Radiation Protection,1999.
- [10] UNSCEAR. Effects and Risks of Ionizing Radiations [M]. New York:United Nations,1988.
- [11] 姚德,曲丽梅,夏宁,等.青岛市土壤天然放射性核素的外照射水平估算研究[J].生态环境,2006, 15(5):979-982.
- YAO De, QU Limei, XIA Ning, et al. Natural Terrestrial External Exposure Level of Nuclides in Soils in Qingdao Area[J]. Ecology and Environment, 2006,15(5):979-982.
- [12] 中国建筑材料联合会.建筑材料放射性核素限量: GB 6566—2010 [S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [13] STOJANOVSKA Z,NEDELKOVSKI D,RISTOVA M. Natural Radioactivity and Human Exposure by Raw Materials and End Product From Cement Industry Used as Building Materials [J]. Radiation Measurements,2010,45(8):969-972.
- [14] BERETKA J,MATHEW P J. Natural Radioactivity of Australian Building Materials, Industrial Wastes and By-Products [J]. Health Physics, 1985, 48 (1): 87-95.
- [15] 何忧.伊犁盆地砂岩型铀矿的水文地球化学成矿机理[D].北京:中国地质大学,2019.
- [16] 刘波.某铀矿山尾矿中有害金属元素的迁移、阻滞及机理研究[D].绵阳:西南科技大学,2017.

《中国环境监测》第四届编委会名单

学术总顾问:魏复盛*

学术顾问:(按姓氏笔画排序)

王子健 王自发 王 桥* 曲久辉* 朱利中* 刘文清* 刘建国
江桂斌* 张远航* 张 兵 郝吉明* 贺克斌* 骆永明 柴发合
高 翔 蔡宗葶(香港)

主 编:王业耀

副 主 编:张大伟 肖建军 王锸一 毛玉如 郭从容 李健军

执行主编:付 强

学术委员:(按姓氏笔画排序)

刀 谓 于云江 于海斌 马广文 王 帅 王 威 王 超 王 强
王圣瑞 王旭涛 王军霞 王英才 王备新 王晓彦 王跃林 方 正
左 航 厉 青 田洪海 冯 丹 邢冠华 师耀龙 吕怡兵 朱 余
乔 琦 伏晴艳 刘 京 刘 闽 刘劲松 刘录三 刘海江 刘通浩
孙宗光 李文攀 李正强 李名升 李红莉 李红梅 李国刚 李宪同
吴 劲 吴传庆 吴晓凤 汪 贇 汪 巍 张 军 张 莹 张 涛
张凤英 张波涛 张胜军 张效伟 张霖琳 陆克定 陈 威 陈吉平
陈传忠 陈春贻 金小伟 郑明辉 孟凡生 孟晓艳 赵克强 赵晓丽
胡冠九 战爱斌 钟 琪 段小丽 姜 兰 姚 波 姚志鹏 秦承华
袁 懋 袁善奎 柴文轩 徐 建 徐能斌 徐耀阳 高吉喜 郭 峰
黄业茹 曹 东 崔永德 康晓凤 彭刚华 董 亮 董广霞 董贵华
嵇晓燕 鲁 玺 温香彩 谢品华 谢剑锋 解 鑫 谭 丽 翟崇治
樊占春 潘 光

注:★为中国科学院院士;*为中国工程院院士。