

doi: 10.12029/gc20210611

许乃政, 匡福祥, 叶隽, 张麟熹, 魏信祥, 曾文乐, 钟启龙. 2021. 华东地区含煤岩系天然放射性水平与生态健康风险评估[J]. 中国地质, 48(6): 1790–1803.

Xu Naizheng, Kuang Fuxiang, Ye Jun, Zhang Linxi, Wei Xinxiang, Zeng Wenle, Zhong Qilong. 2021. Natural radioactive level and ecological health assessment of coal-bearing strata in the East China[J]. *Geology in China*, 48(6): 1790–1803(in Chinese with English abstract).

华东地区含煤岩系天然放射性水平 与生态健康风险评估

许乃政^{1,2}, 匡福祥¹, 叶隽¹, 张麟熹³, 魏信祥³, 曾文乐⁴, 钟启龙⁴

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 2. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏南京 210016; 3. 江西核工业地质局测试研究中心, 江西南昌 330002; 4. 江西核工业地质局, 江西南昌 330046)

摘要: 本次研究基于地表 γ 辐射剂量率、氡放射性测量及 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素测试, 识别华东地区含煤岩系的放射性异常地层, 评价区域典型煤矿区空气、固体、水体、植物介质的天然放射性水平。结果显示: 赋存于石炭系、二叠系的普通煤田与赋存于寒武系的石煤矿区呈现显著差异的天然放射性水平。普通煤田矿区地表 γ 辐射剂量率、氡放射性测量值总体上处于本底水平范围, 矿区固体介质、水体、植物样品核素含量处于正常水平, 不存在放射性污染。华东地区石煤分布带, 属于放射性 γ 辐射高背景区, 石煤矿区的原煤、煤矸石、土壤、岩石等固体介质的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素富集明显, 并显示更为显著的空间变异性。区域石煤条带监测矿区居民源于 γ 外照射引起的吸收剂量均超过国际标准限值 1 mSv/a, 总有效剂量均超过了 2 mSv/a, 地下水总 α 、总 β 浓度为限值的 10~30 倍, 放射性污染不容忽视。华东地区石煤矿区公众所受辐射剂量较高, 矿区的地下水、建材、植物等介质已经出现零星的放射性污染, 应加强石煤矿区放射性环境监测, 及时采取适当的控制措施。

关键词: 含煤岩系; 天然放射性; 放射性辐射剂量; 生态健康; 煤田地质调查工程; 华东地区
中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)06-1790-14

Natural radioactive level and ecological health assessment of coal-bearing strata in the East China

XU Naizheng^{1,2}, KUANG Fuxiang¹, YE Jun¹, ZHANG Linxi³,
WEI Xinxiang³, ZENG Wenle⁴, ZHONG Qilong⁴

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Jiangxi Nuclear Industry Geological Bureau Testing Center, Nanchang 330002, Jiangxi, China; 4. Jiangxi Nuclear Industry Geological Bureau, Nanchang 330046, Jiangxi, China)

Abstract: Based on the measurement of γ radiation dose rate, radon radioactivity and ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K radionuclide testing, the

收稿日期: 2019-05-13; 改回日期: 2020-01-06

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20190354, DD20160135) 和江苏省自然科学基金 (BK20151093) 联合资助。

作者简介: 许乃政, 男, 1971 年生, 研究员, 主要从事环境科学研究; E-mail: xzzz100@sina.com。

通讯作者: 匡福祥, 男, 1963 年生, 高级工程师, 主要从事地质学研究; E-mail: 857801829@qq.com。

radioactive anomalies of coal-bearing strata in East China were identified to evaluate the specific activities of natural radionuclides in air, solid, water and plant in the typical area of the regional coal-bearing occurrences. The results show that there are significant differences in natural radioactivity between the Carboniferous-Permian common coalfields and the Cambrian stone coal occurrences. The γ radiation dose rate and radon radioactivity measured on the surface of ordinary coal mining area are generally in the background level range, and the nuclide content of solid medium, water body and plant samples in the mining area is in the normal level, and there is no radioactive pollution. The stone coal distribution zone in East China belongs to the high background region of radioactive γ radiation, and the ^{238}U and ^{226}Ra obviously are accumulated in coal, coal gangue, soil, rock, and the spatial distribution of these natural radionuclides shows significant variability. In the monitoring area, the effective dose of γ radiation exceeds the international limit value of 1 mSv/a, the total effective dose exceeded 2 mSv/a, and total α and total β concentrations of the groundwater are 10~30 times of the limit values. The γ radiation shows higher background value in the stone coal-bearing area, and radioactive pollution cannot be ignored. The public in the stone coal area of the East China is subjected to higher radiation dose, and groundwater, building material and plant have been contaminated by radioactive pollution sporadically. It is necessary to strengthen monitoring of radioactive environment and take appropriate control measures.

Key words: coal-bearing strata; natural radioactivity; radiation dose; ecological health; coal geology survey engineering; East China

About author: XU Naizheng, male, born in 1971, researcher, engaged in environmental science; E-mail: xzzz100@sina.com.

Corresponding author: KUANG Fuxiang, male, born in 1963, senior engineer, engaged in geological research; E-mail: 857801829@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (DD20190354, DD20160135) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20151093).

1 引言

天然辐射主要来自地表介质中天然放射核素的衰变,少部分来自宇宙射线。放射性核素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 等的衰变产生衰变子体,同时释放 α 、 β 、 γ 射线。含放射性核素的煤矿开发利用,其中的天然放射性核素排入大气、土壤、水体介质,从而增加了环境中原有天然放射性核素的浓度,进而可能引起放射性污染(Ye et al., 2004a; Jiang, 2007; Chalupnik et al., 2017; Skoko et al., 2017; Galhardi et al., 2017; Křibek et al., 2018; Wufuer et al., 2018)。当前对放射性环境分析研究主要集中在原煤(煤矸石)(Huang and Tan, 2002; Xiong et al., 2004; Wang et al., 2017; Liu et al., 2020)、土壤(Yue et al., 2011; Galhardi et al., 2017; Skoko et al., 2017)、生物(Zhang et al., 2011; Galhardi et al., 2017; Skoko et al., 2017; Wufuer et al., 2018)、水体(Chalupnik et al., 2017; Křibek et al., 2018)、岩石(Chen et al., 2005; Zeng et al., 2005; Galhardi et al., 2017)等单一介质的调查分析,缺乏从地质背景、地球化学作用过程、元素迁移循环和人类生产生活等不同角度开展放射性核素的地球化学元素分布、分配规律研究。

中国含煤岩系放射性的专题研究始于1960年代,1980年代开展的全国环境天然放射性水平调查(Luo et al., 1995)、2000年代建立的全国煤矿放射性核素含量数据库(Liu et al., 2006, 2007)为放射性环境调查研究提供了基准数据与评价依据。已经开展的华东地区含煤岩系的放射性调查研究主要针对地表或浅地表的石煤层(Lu, 2003; Ye et al., 2004b; Wang et al., 2017; Xu et al., 2018),基本调查网格为25 km×25 km、50 km×50 km,研究资料零星粗略,调查评价精度低。从1990年代开始,华东地区煤矿历经大规模开发、关停、复垦,矿区开采后的放射性环境质量,对全域范围内的含煤岩系的放射性状况没有开展专门的调查研究工作。煤田放射性环境调查评价没有专门的规范性文件,本次调查研究基于放射性环境调查评价技术方法,参照国际机构(国际原子能机构、世界卫生组织)的评价标准,通过野外放射性监测与室内放射性实验测试分析,分析华东地区典型煤田介质(岩石、土壤、水体、大气)中放射性地质背景和环境放射性现状,圈定放射性异常地层,以期为区域放射性污染监测与治理提供基础资料。野外监测与实验测试结果,相互印证,可有效反映放射性核素的赋存与迁移特征。本

项目尝试采用的技术方法可为相关放射性环境调查评价提供参照。

2 研究区概况

华东地区地处中国东部沿海,地理坐标:23°30'~35°08'N,113°34'~123°40'E,包括上海、浙江、江苏、福建、江西、安徽五省一市,总面积63.86万km²。该区地域辽阔,气候多变,从北到南由暖温带半湿润季风气候、过渡到亚热带-热带湿润季风气候带。华东地区位于欧亚板块南缘,东临西太平洋,跨华北板块、扬子板块、东南沿海造山系3个构造单元,它是欧亚大陆向东、向南增生,随后大陆解体-大陆板块裂解的典型构造区(Zhang et al., 2015; 图1)。

华东地区含煤岩系主要赋存于寒武系、石炭系、二叠系、三叠系,现有开采煤矿山约2000座,其中大中型矿山约100座。赋存于石炭系、二叠系的普通煤田,空间上主要分布在江苏徐州、安徽两淮以及江西萍乡-乐平拗陷带(图1),江苏徐州、安徽两淮的含煤岩系主要为石炭系,江西、福建、浙江及安徽南部、江苏南部主要为二叠系。石煤是特殊组分的劣质煤,炭质含量低,煤化程度低,挥发分高,主要产出于寒武系,空间上处于江南古陆东南与西北缘(Zhang et al., 2015),呈NE向条带状展布,主要分布在浙江、江西、安徽省的丘陵山区。

3 调查研究方法

为了使调查结果具有较好的代表性,根据以往放射性调查记录,本次研究选择具有代表性的9处普通煤田作为一般调查区实施调查,选择曾有放射性记录的6处石煤集中区进行重点调查,调查评价的典型煤矿分属华东地区主要的含煤岩系与煤矿类型。调查的普通煤田包括福建永定、安徽淮南、江苏徐州煤田及江西萍乡、丰城、乐平、铅山煤田,调查的石煤集中区主要分布在江西修水与上饶、安徽歙县与石台、浙江开化与建德地区(图1)。

本次研究共开展地表 γ 辐射剂量率测量320点,氡浓度与氡析出率监测67点,监测面积425 km²,共采集分析矿区固体、水体、植物介质样品435个。本次野外监测开展地表 γ 辐射剂量率、氡浓度与析出率测量,放射性测量评价依据《环境地表 γ 辐射剂量

率测定规范》(SEPA, 1993)与《铀矿地质辐射环境影响评价要求》(CNIC, 1995)规范执行。地表 γ 辐射剂量率采用精度为1 km×0.5 km(局部1 km×1 km)网格法布设监测点,以环境X、 γ 剂量率仪(型号:FHT40-NBR)测定;在石煤矿点出露区开展空气氡浓度测量,以高灵敏度环境测氡仪(型号:RAD7)测定。本次采样以近似网格法布设采样点,采样方法参照《多目标区域地球化学调查规范(1:25万)》(DD2005-01)执行,分析测试质量按EJ/T 751-2014《放射性矿产地质分析测试实验室质量保证规范》(CGS, 2014)等标准执行。固体、植物样品分析测试²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K放射性核素比活度,水样分析项目为²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K、总 α 、总 β 。本次调查研究应用的实验测试分析与野外监测技术参数见表1。

统计分析以SPSS19.0为平台进行描述统计、相关分析、回归分析,专题图以MapGIS 6.7、Surfer 12为平台制作。

4 结果与分析

4.1 固体介质样品核素浓度

本次研究采集华东地区含煤岩系的原煤(石煤)、煤渣、炭化砖、煤矸石、土壤、水系沉积物、岩石等7类固体介质样品,共采集测试各类固体介质样品293个,其中普通煤田样品78个,石煤矿区样品115个(表2)。

华东地区普通煤田原煤的²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K放射性核素含量分别为(56.0±20.5)、(47.7±16.4)、(54.7±21.9)、(284.6±185.7) Bq/kg,变异系数分别为0.37、0.34、0.40、0.65;石煤的²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K放射性核素含量分别为(790.0±1383.4)、(29.8±19.7)、(778.1±670.2)、(656.9±475.3) Bq/kg,变异系数分别为1.75、0.49、0.86、0.72,石煤中4种核素空间变异性更为明显。石煤原煤的²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K均值是普通煤田的14.11、0.62、14.22、2.31倍,显示核素²³⁸U、²²⁶Ra、⁴⁰K在石煤原煤中的显著富集。本次分析普通煤田的²³⁸U、²²⁶Ra均值比全国原煤测量值略低(0.70倍、0.74倍),²³²Th、⁴⁰K均值比全国原煤测量值高(1.18、1.87倍);石煤原煤²³⁸U、²²⁶Ra、⁴⁰K是全国原煤测量值的9.94、10.53、4.31倍,²³²Th比全国原煤测量值略低(0.74倍)(Liu et al., 2007),也显示研究区石煤对²³⁸U、²²⁶Ra、⁴⁰K核素的强烈富集作用。华东

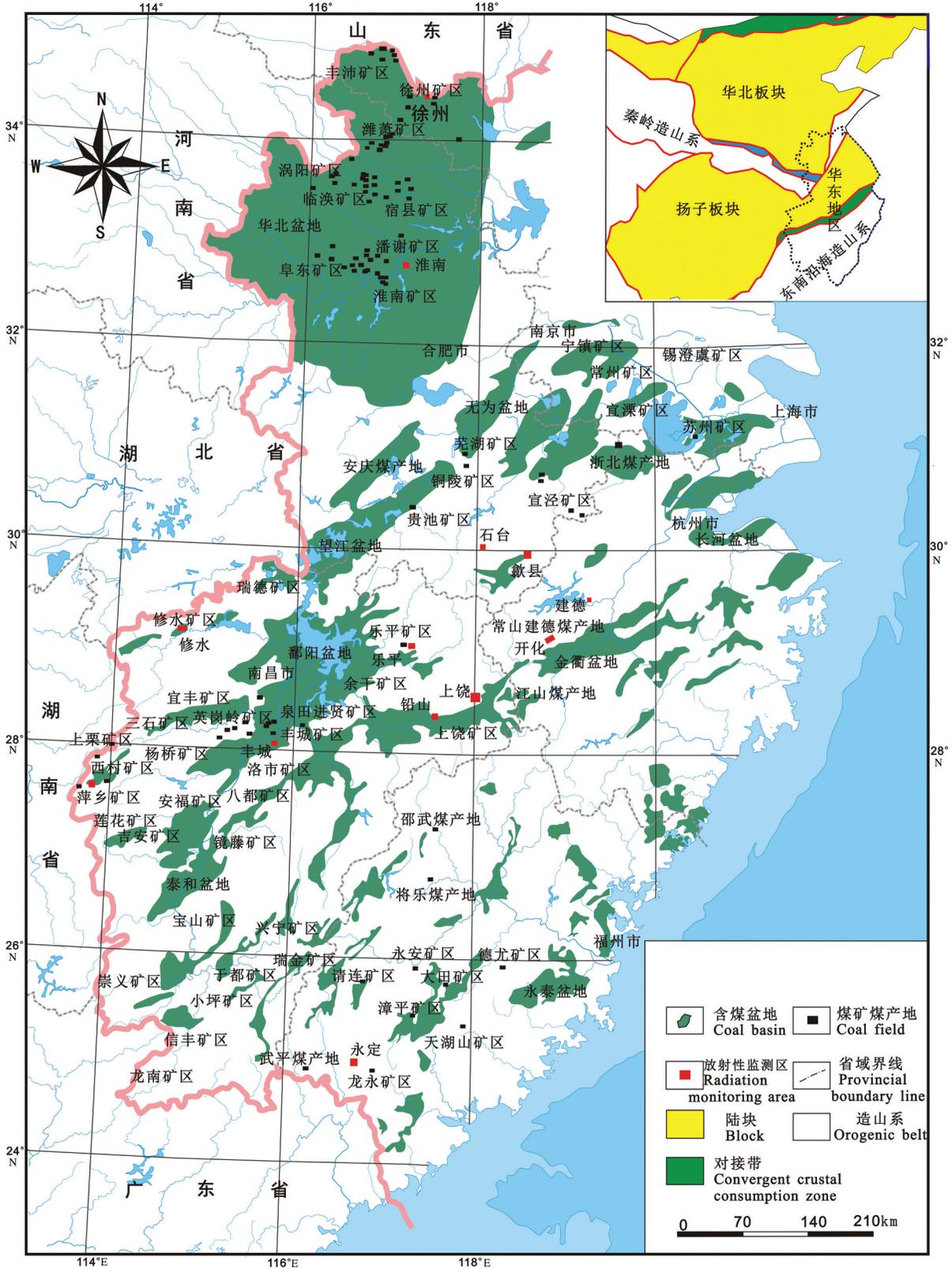


图1 华东地区含煤岩系分布与放射性环境监测工作区

Fig.1 Distribution of coal-bearing strata and radioactivity monitoring area in the East China

表1 华东地区放射性核素实验分析与放射性野外监测技术参数

Table 1 Measurement techniques for laboratory analyses and radioactivity survey parameters of the coal-bearing strata in the East China

测量项目	仪器设备	设备型号	仪器厂商	灵敏度	精度	
水体样品	²³⁸ U	激光荧光铀仪	HD-3025	北京中核公司	0.03 ng/ml	≤±8%
	²³² Th	紫外可见分光光度计	UV-1200	美析仪器公司	0.001 ng/ml	≤±5%
	²²⁶ Ra	氡钍分析仪	FD125	北京中核公司	1.27 mBq/l	≤±10%
	⁴⁰ K	原子吸收分光光度计	CAAm-2001	北京浩天晖仪器公司	2.86 mBq/l	≤±5%
	total α, total β	低本底α、β测量仪	HD-2011	北京中核公司	α:0.005 Bq/l;β:0.025 Bq/l	α:≤±2%; β:≤±3%
固体与植物样品	²³⁸ U, ²³² Th, ²²⁶ Ra, ⁴⁰ K	HP 锗γ谱仪	ADCAM-100	ORTEC, USA	对 ⁶⁰ Co的1.33 MeV的探测效率和光电峰能量分辨率分别为30%和1.8 KeV	²³⁸ U:5.7%~1.1%* ²³² Th:26.6%~0.6%*; ²²⁶ Ra:7.6%~2.1%*; ⁴⁰ K:7.7%~0.3%*
放射性野外监测	Γ剂量率测量	X、γ剂量率仪	FHT40NBR	Thermo fisher, USA	2000s-1/μSv/h	≤±5%
	氡浓度、析出率测量	环境氡监测仪	RAD7	Durridge, USA	0.5 CPM/pCi/L	≤±5%

注:* 根据江西核工业地质局测试研究中心实验室外检结果计算。

地区石炭系含煤岩系原煤的²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K放射性核素含量分别为(37.1±8.5)、(41.8±16.2)、(37.6±8.6)、(120.4±112.0) Bq/kg, 二叠系原煤的相应核素含量分别为(61.4±19.7)、(49.3±16.5)、(59.6±22.2)、(331.6±176.9) Bq/kg, 与寒武系石煤的相应核素含量相比, 反映出寒武系石煤与二叠系、石炭系含煤岩系显著差异的放射性核素地球化学背景。

华东地区普通煤田的煤矸石的²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K放射性核素含量分别为(64.0±23.2)、(79.2±31.6)、(56.6±27.2)、(577.9±191.8) Bq/kg, 变异系数分别为0.36、0.40、0.48、0.33; 含石煤岩系煤矸石的²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K放射性核素含量分别为(382.2±349.1)、(28.1±21.0)、(471.9±433.9)、(714.7±637.5) Bq/kg, 变异系数分别为0.91、0.75、0.92、0.89,

表2 华东地区含煤岩系固体介质中天然放射性核素均值比活度

Table 2 The specific activities of natural radio-nuclides in solid media of coal-bearing strata in the East China

煤矿类型	含煤地层	放射性介质	样品数量/个	²³⁸ U/(Bq/kg)	²³² Th/(Bq/kg)	²²⁶ Ra/(Bq/kg)	⁴⁰ K/(Bq/kg)
普通煤田	石炭系、二叠系、三叠系	原煤	27	56.0±20.5	47.7±16.4	54.7±21.9	284.6±185.7
		煤矸石	16	64.0±23.2	79.2±31.6	56.6±27.2	577.9±191.8
		土壤	19	60.5±32.0	52.2±17.0	58.5±30.8	444.5±152.0
		煤渣	5	166.4±81.5	128.0±48.5	168.8±97.6	576.0±202.0
		岩石	11	62.4±70.5	48.6±36.5	56.1±70.2	411.1±377.0
石煤	寒武系	石煤	19	790.0±1383.4	29.8±19.7	778.1±670.2	656.9±475.3
		煤矸石	25	382.2±349.1	28.1±21.0	471.9±433.9	714.7±637.5
		土壤	101	102.9±121.9	49.1±15.4	104.8±117.6	556.1±201.1
		煤渣	5	196.7±115.4	44.8±14.4	258.4±102.3	1038.9±576.9
		水系沉积物	13	70.4±65.5	40.0±10.1	58.7±52.7	728.5±180.3
		炭化砖	4	295.3±245.6	31.9±32.0	200.4±249.2	296.6±259.6
		岩石	48	106.3±355.5	34.5±18.7	300.8±651.3	634.2±498.0
全国		原煤	1014	79.5±45.0	40.3±34.0	73.9±53.0	152.4±2121.0
		煤矸石	879	79.8±34.0	64.5±38.0	59.7±44.0	506.3±477.0
		土壤	7777	39.5±34.4	49.1±27.6	36.5±22.0	580.0±202.0

也显示4种核素在石煤煤矸石中明显的空间变异性。普通煤田煤矸石取样分析的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 均值比全国煤矸石测量值略低(0.80、0.95倍), ^{232}Th 、 ^{40}K 均值比全国煤矸石测量值略高(1.23、1.14倍);石煤煤矸石 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 是全国煤矸石测量值的4.79、7.90、1.41倍, ^{232}Th 比全国煤矸石测量值降低明显(0.44倍)(Liu et al., 2007),显示研究区石煤煤矸石对 ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素的强烈富集,对 ^{232}Th 核素的明显贫化。

华东地区普通煤田的矿区土壤 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素含量分别为(60.5±32.0)、(52.2±17.0)、(58.5±30.8)、(444.5±152.0) Bq/kg,变异系数分别为0.53、0.33、0.53、0.34;含石煤岩系的矿区土壤放射性核素含量分别为(102.9±121.9)、(49.1±15.4)、(104.8±117.6)、(556.1±201.1) Bq/kg;变异系数分别为1.18、0.31、1.12、0.36,显示 ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素分布极显著的空间变异性。普通煤田土壤的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 是全国土壤测量值的1.53、1.66倍,石煤矿区土壤的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 是全国土壤测量值的2.61、2.87倍,全区煤田 ^{232}Th 、 ^{40}K 与全国土壤测量值相近(Luo et al., 1995),显示华东地区含煤岩系矿区土壤的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素的高背景辐射水平。

华东地区普通煤田含煤岩系矿区岩石的 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素含量分别为(62.4±70.5)、(48.6±36.5)、(56.1±70.2)、(411.1±377.0) Bq/kg,变异系数分别为1.13、0.75、1.25、0.92;华东地区石煤矿区岩石 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素含量分别为(106.3±355.5)、(34.5±18.7)、(300.8±651.3)、(634.2±498.0) Bq/kg,变异系数分别为3.34、0.54、2.17、0.79,显示全区含煤岩系核素分布极显著的时空变异性。华东地区陆壳的U元素丰度为 3.7×10^{-6} ,是地球陆壳丰度的1.37倍,华东地区下寒武统的U丰度范围为 $20 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 。本次测试分析石煤矿区岩石为下寒武统,反映出含石煤岩系高背景的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 岩石地球化学背景。与矿区土壤的核素相比,矿区岩石4种核素呈现更大的含量范围与变异系数。矿区土壤是由矿区岩石风化蚀变形成,反映出煤田核素地质背景对土壤核素水平的制约,也显示成壤过程伴随着核素时空分布的均一化过程。

华东地区含石煤岩系工作区的水系沉积物 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素含量分别为

(70.4±65.5)、(40.0±10.1)、(58.7±52.7)、(728.5±180.3) Bq/kg,放射性核素含量较低。石煤煤渣中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素含量分别为(196.7±115.4)、(44.8±14.4)、(258.4±102.3)、(1038.9±576.9) Bq/kg,石煤经燃烧后核素浓集作用不明显。普通煤田原煤煤渣中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素含量分别为(166.4±81.5)、(128.0±48.5)、(168.8±97.6)、(576.0±202.0) Bq/kg,4种核素均值分别是原煤均值的2.97、2.68、3.09、2.02倍,原煤经燃烧后核素呈现浓集作用。利用煤渣、煤矸石制作炭化砖是石煤矿区比较常见的建材,本次研究检测炭化砖的 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性核素含量分别为(368.3±242.0)、(16.2±7.7)、(234.3±293.8)、(184.5±160.3) Bq/kg,总体上与煤矸石、煤渣中的核素含量相当。所检测的部分炭化砖样品 ^{226}Ra 含量超过国家标准的限值(≤ 200 Bq/kg)(Lu, 2003),应禁止作建筑材料利用。

4.2 水体样品核素浓度

本次研究采集水体样品为地表水和地下水,地表水主要取自矿区河流、湖泊,地下水取自矿区浅井、矿坑,共采集测试地表水样品60个,地下水样品40个(表3)。

普通煤田矿区地表水 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 放射性活度分别为(34.42±68.98)、(0.31±0.38)、(6.05±5.62)、(200.17±174.06) mBq/L,总 α 、总 β 放射性活度分别为(0.06±0.09)、(0.20±0.16) Bq/kg;普通煤田矿区地下水 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 核素浓度分别为(30.33±50.09)、(0.10±0.08)、(5.41±4.07)、(201.33±260.99) mBq/L,总 α 、总 β 放射性活度分别为(0.05±0.05)、(0.16±0.13) Bq/L。与全国环境天然放射性水平调查(1990s)的河水、井水放射性活度比较(Luo et al., 1995),本次研究显示普通煤田矿区水体核素含量总体上处于正常水平。普通煤田矿区地表水与地下水的放射性核素浓度总体差异不明显,总 α 、总 β 放射性活度远低于世界卫生组织生活饮用水卫生标准的限值0.5 Bq/L、1 Bq/L(WHO, 2011),不存在放射性污染。

石煤矿区地表水 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 核素浓度分别为(158.79±568.34)、(0.52±2.01)、(28.00±55.78)、(53.84±55.46) mBq/L,总 α 、总 β 放射性活度分别为(0.17±0.55)、(0.18±0.39) Bq/kg。 ^{238}U 、 ^{226}Ra

表 3 华东地区含煤岩系水体介质样品天然放射性核素活度

Table 3 The specific activities of natural radio-nuclides in water media of coal-bearing strata in the East China

煤矿类型	含煤地层	放射性介质	样品数量/个	$^{238}\text{U}/(\text{mBq/L})$	$^{232}\text{Th}/(\text{mBq/L})$	$^{226}\text{Ra}/(\text{mBq/L})$	$^{40}\text{K}/(\text{mBq/L})$	总 $\alpha/(\text{Bq/L})$	总 $\beta/(\text{Bq/L})$
普通煤田	石炭系、二叠系、三叠系	矿区地表水	22	34.42±68.98	0.31±0.38	6.05±5.62	200.17±174.06	0.06±0.09	0.20±0.16
		煤矿区地下水	10	30.33±50.09	0.10±0.08	5.41±4.07	201.33±260.99	0.05±0.05	0.16±0.13
石煤	寒武系	矿区地表水	38	158.79±568.34	0.52±2.01	28.00±55.78	53.84±55.46	0.17±0.55	0.18±0.39
		矿区地下水	30	1442.18±3201.28	18.06±50.73	37.55±64.79	120.96±245.71	2.02±3.65	2.20±4.02
全国*		河水	2903	20.49±34.94	1.26±2.07	6.05±7.31	143.7±441.3	/	/
		农村浅井水	713	47.16±97.04	0.61±1.55	7.16±12.62	191.9±401.9	/	/

注：* 据全国水体中天然放射性核素浓度换算。

核素均值是普通煤田地表水均值的4~5倍,地表水核素含量总体上处于正常水平,仅发现零星的放射性污染。地下水 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 与总 α 、总 β 放射性活度分别为(1442.18±3201.28)、(18.06±50.73)、(37.55±64.79)、(120.96±245.71)mBq/L与(2.02±3.65)、(2.20±4.02)Bq/kg, ^{238}U 、总 α 、总 β 活度是地表水均值的8~12倍,总 α 和总 β 都超过了世界卫生组织饮用水卫生标准的限值0.5 Bq/L、1 Bq/L(WHO, 2011),部分矿点总 α 和总 β 浓度为限值的10~30倍。由于不同含煤岩系核素地球化学丰度与元素地球化学性质活泼程度的影响,放射性核素在不同类型水体中的分布差异明显。 ^{238}U 、总 α 、总 β 浓度高的地下水,其pH均较低(<5),在酸性条件下

U 、 Ra 核素显示较强的地球化学活性。石煤矿区水体存在放射性污染,建议相关部门对石煤矿区排水进行适当监管,不宜直接用于生活用水。

4.3 植物样品核素浓度

本次研究所取植物样品都为当地广泛分布且具有代表性的指示性植物,如玉米、松针、芦苇、茶叶、红薯等,其中玉米样品分别取根、茎、种子进行核素分析,共采集测试植物组织样品25个(表4)。

华东地区普通煤田矿区植物体组织中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 核素含量分别为(0.42±0.34)、(0.34±0.25)、(0.47±0.27)、(195.01±184.33)Bq/kg,变异系数分别为0.81、0.74、0.57、0.95;石煤矿区植物体组织中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 核素含量分别为

表 4 华东地区含煤岩系植物样品天然放射性核素活度浓度

Table 4 The specific activities of natural radio-nuclides in plant sample of coal-bearing strata in the East China

煤矿类型	采样地点	植物种类	样品数量/个	$^{238}\text{U}/(\text{Bq/kg})$	$^{232}\text{Th}/(\text{Bq/kg})$	$^{226}\text{Ra}/(\text{Bq/kg})$	$^{40}\text{K}/(\text{Bq/kg})$
普通煤田	安徽淮南	红薯	1	0.01	0.01	0.11	62.88
	江西萍乡	松树	1	0.34	0.50	0.75	236.70
	江西丰城	松树	1	0.84	0.63	0.41	79.93
	江西乐平	小松树	1	0.68	0.41	0.37	94.86
	江西铅山	松树	1	0.21	0.17	0.72	500.70
石煤		玉米根	3	3.67	1.11	3.34	130.20
	安徽歙县	玉米茎	3	1.65	0.34	2.47	283.10
		玉米种子	3	0.21	0.07	0.58	94.97
	安徽石台	茶叶	1	0.20	0.02	1.49	117.70
		红薯	1	0.01	0.01	0.11	62.88
		松针	1	0.06	0.06	0.51	24.26
	江西修水	杉叶	1	0.12	0.03	1.55	120.70
		巴茂草	1	0.02	0.01	1.24	82.42
	浙江开化	松针	1	2.16	0.25	3.97	105.70
		芦苇	1	5.67	0.11	185.30	126.90
浙江建德	杉叶	1	0.24	0.10	3.20	108.20	
	松针	1	0.22	0.02	1.35	69.00	

(1.19 ± 4.82)、(0.18 ± 0.31)、(17.09 ± 52.99)、(110.50 ± 62.59) Bq/kg, 变异系数分别为 4.05、1.72、3.10、0.57。石煤矿区植物核素分布呈现极显著的空间变异性, ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素富集明显。植物组织中的核素含量与各类植物的核素吸收富集能力有关,也与植物生长的土壤天然放射性核素本底值密切相关(Galhardi et al., 2017; Skoko et al., 2017)。石煤矿区土壤具有 ^{238}U 、 ^{226}Ra 含量较高的特征,植物体 ^{238}U 、 ^{226}Ra 含量明显升高,植物体中核素含量与土壤核素含量呈现正相关。植物体不同组织吸收富集核素的能力存在差异,本次研究发现玉米的根、茎、种子的 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 含量差异明显,放射性活度依次锐减。矿区土壤 ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素高背景辐射水平与显著变异的分布,以及植物对放射性核素的吸收能力的差异,决定了植物体核素分布极显著的空间变异性。总体而言华东地区煤矿区的植物样核素比活度较低,当地正常种植和食用不存在放射性风险。当前 ^{226}Ra 的超富集植物为铁芒萁(Zhang et al., 2011),本次研究发现浙江开化矿区植物(芦苇)样品 ^{226}Ra 含量高达185.3 Bq/kg,是正常本底地区同类植物含量的100多倍,并且远超国家食品中核素含量限值,显示明显的 ^{226}Ra 富集特征;由于数据较少,可能代表性不够,值得进一步调查研究。

4.4 地表 γ 外照射、氡内照射强度与有效剂量评估

地表空间是人类生活的场所,环境地表时刻受到来自宇宙与天然放射核素 γ 射线的照射。天然辐射是人类所受辐射照射的主要来源,氡及其子体产生的辐射是天然辐射的主要来源(UNSCEAR, 2000; Pan and Liu, 2011; Wang et al., 2014)。正常剂量的 γ 射线照射对人体健康不会造成损害,但高强度的 γ 射线照射可能会对人体的肌体及器官产生损伤。 γ 射线对人体的损害决定于照射强度及作用时间。世界人口年人均接受辐射剂量大约2.4 mSv,其中所受吸入内照射与地面外照射分别为1.26、0.48 mSv(UNSCEAR, 2000)。通常一般公众年人均附加照射剂量不应超过1 mSv(IAEA, 2014)。

煤矿矿区公众的有效辐射剂量主要源自外照射与空气吸入途径,源自食入途径的比例甚少(不到5%)。

按照《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》(GB/T

14583-93)(SEPA, 1993)提供的 γ 外照射年有效剂量估算公式:

$$H_t = D_t \times K \times t$$

式中: H_t ,有效剂量,Sv/a;

D_t , γ 辐射空气吸收剂量率,Gy/h;

K ,剂量转换系数,取0.7 Sv/Gy;

t ,一年中公众在环境中停留时间,一般取8760 h。

按照《铀矿地质辐射环境影响评价要求》(EJ/T 977-1995)(CNIC, 1995)中公众吸入氡子体所致内照射有效剂量估算公式:

$$H_c = 0.5 \times \bar{X} \times g_E \times t$$

式中: H_c ,有效剂量,Sv/a;

0.5,氡与其子体的平衡因子;

\bar{X} ,氡平均浓度,Bq/m³;

g_E ,成人室外氡子体吸入剂量转换因子,取 1.7×10^{-8} Sv/(Bq·h/m³);

t ,一年中公众在环境中停留时间,一般取8760 h。

本次研究选择华东主要含煤岩系的13处煤产地开展了地表 γ 辐射剂量率测量、氡浓度与氡析出率测量,并计算矿区成人 γ 外照射年有效剂量、吸入氡子体年有效剂量及总有效剂量(表5)。

华东地区普通煤田地表 γ 辐射剂量率为(95.2 ± 46.8)nGy/h,变化范围为48.0~176.9 nGy/h;氡浓度与氡析出率分别为(19.5 ± 8.9)Bq/m³、(0.1025 ± 0.0798)Bq/m²·s,变化范围分别为5.4~35.7 Bq/m³、0.0016~0.3124 Bq/m²·s,显示地表天然辐射空间分布的不均一性;地表 γ 辐射剂量率整体处于正常本底水平范围,均未超过煤系地层 γ 辐射剂量率分级普通区阈值(<174 nGy/h)。全区监测普通煤矿 γ 外照射年有效剂量为(0.58 ± 0.20)mSv/a,吸入氡子体年有效剂量为(1.52 ± 0.56)mSv/a,矿区居民总有效剂量为(2.10 ± 0.56)mSv/a,普通煤矿矿区公众所受天然辐射大部分源自空气吸入途径,源自 γ 外照射引起的吸收剂量均未超过国际标准限值1 mSv/a(IAEA, 2014)。空气氡浓度均值与全国空气氡浓度均值(20.7 Bq/m³)相当,土壤氡析出率均值远高于全国土壤氡析出率均值(0.0043 Bq/m²·s),但全部测点空气氡浓度均低于世界卫生组织(WHO)推荐的限值(100 Bq/m³)(Wang et al., 2014),全部测点土壤氡析出率均远低于国家标准限制(0.74 Bq/m²·s)(SEPA, 1993)。

华东地区主要石煤分布带监测区的地表 γ 辐射

表5 华东地区含煤岩系地表 γ 外照射、氡放射性监测及有效剂量Table 5 Radioactivity monitoring of terrestrial γ -external dose rate, radon and annual effective dose of natural radio-nuclides in coal-bearing strata in the East China

煤矿类型	监测矿点	调查面积/km ²	地表 γ 辐射剂量率/(nGy/h)		γ 外照射年有效剂量/(mSv/a)		氡浓度*/(Bq/m ³)		氡析出率/(Bq/m ² ·s)		吸入氡子体年有效剂量/(mSv/a)		总有效剂量/(mSv/a)
			均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	
普通煤田	福建永定	25	128	83~166	0.78	0.51~1.02	20.7	14~27	0.0043	0.0032~0.0059	1.54	1.04~2.01	2.32
	安徽淮南	15	61	42~78	0.37	0.26~0.48	32.9	33~34	0.0100	0.0090~0.0120	2.45	2.45~2.53	2.82
	江西萍乡	20	137	101~170	0.84	0.62~1.04	23.9	11~35	0.1926	0.1188~0.3125	1.78	0.82~2.61	2.62
	江西丰城	15	118	80~177	0.73	0.49~1.08	13.7	5~22	0.1381	0.1012~0.1725	1.02	0.37~1.64	1.75
	江西乐平	15	66	44~92	0.40	0.27~0.57	10.8	5~22	0.1310	0.1119~0.1646	0.80	0.37~1.63	1.20
	江西铅山	15	86	46~125	0.53	0.28~0.77	16.6	11~28	0.1422	0.1103~0.1614	1.24	0.82~2.08	1.77
	江苏徐州	10	63	48~78	0.39	0.29~0.48	24.2	22~31	0.0031	0.0016~0.0042	1.80	1.64~2.31	2.19
石煤	安徽歙县	69	183	52~725	1.12	0.32~4.45	47.1	33~81	0.0940	0.0120~0.2640	3.51	2.46~6.03	4.63
	安徽石台	16	218	71~956	1.34	0.44~5.86	61.8	33~98	0.0510	0.0100~0.0780	4.60	2.46~7.30	5.94
	江西修水	55	304	70~1179	1.86	0.43~7.23	12.2	3~31	0.1165	0.0357~0.2966	0.91	0.22~2.31	2.77
	浙江开化	50	205	61~1514	1.26	0.37~9.28	20.7	12~28	0.0043	0.0024~0.0060	1.54	0.89~2.08	2.80
	浙江建德	30	210	55~571	1.29	0.34~3.50	40.3	22~59	0.0100	0.0097~0.0102	3.00	1.64~4.39	4.29
	江西上饶	90	209	60~1164	1.28	0.37~7.14	42.6	18~72	0.0251	0.0049~0.0713	3.17	1.34~5.36	4.45

注:* 室外氡浓度。

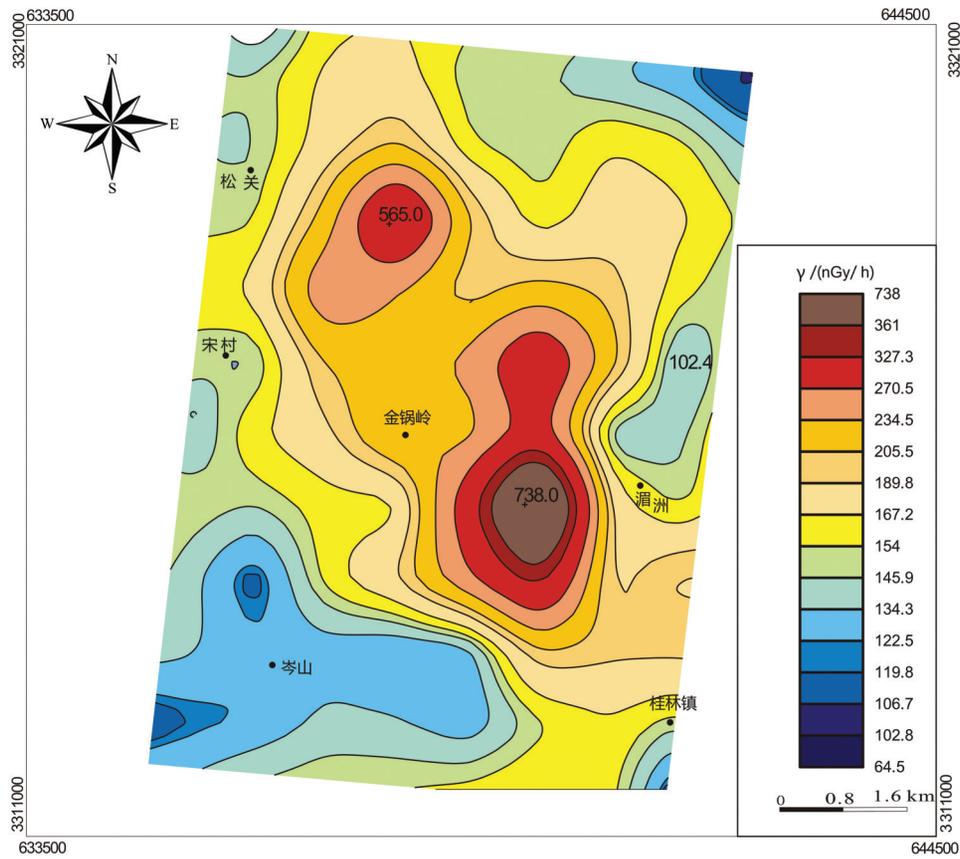
剂量率为(221.5±42.10) nGy/h, 变化范围为52~1514 nGy/h; 氡浓度与氡析出率分别为(37.5±18.1) Bq/m³、(0.0502±0.0462) Bq/m²·s, 变化范围分别为3.0~98.0 Bq/m³、0.0024~0.2966 Bq/m²·s。各监测区地表 γ 辐射剂量率均值均超过煤系地层 γ 辐射剂量率分级普通区阈值, 属于整体放射性高值区。全区监测石煤矿点 γ 外照射年有效剂量为(1.36±0.26) mSv/a, 吸入氡子体年有效剂量为(2.79±1.35) mSv/a, 矿区居民总有效剂量为(4.15±1.21) mSv/a, 石煤矿区公众所受天然辐射主要源自 γ 外照射与空气氡子体吸入途径。源于 γ 外照射引起的吸收剂量均超过了国际标准限值1 mSv/a, 总有效剂量均超过了2 mSv/a, 部分石煤矿集中分布区, 如在安徽石台、浙江开化、江西修水与上饶监测区的 γ 外照射引起的有效剂量都高于中国标准警戒限值5 mSv/a。安徽歙县、石台与江西上饶石煤矿区地表氡浓度均值超过30 Bq/m³, 吸入氡子体年有效剂量均超过3 mSv/a。石煤矿区的放射污染不容忽视, 环境开发或经济建设都应进行严格的放射性监测。

安徽歙县工作区的 γ 辐射空气吸收剂量率等值图呈现出明显的“中间高、四周低”分布规律, 形成近似北西-南东向的高值场, 其形态近似椭圆形(图2)。在石煤矿点集中地形成两个突出的高值中心, 位于矿区东南的高值中心 γ 剂量率为738 nGy/h, 位

于矿区西北的高值中心 γ 剂量率为565 nGy/h。扣除歙县工作区 γ 辐射本底(75.4 nGy/h)及仪器对宇宙射线的响应(12.9 nGy/h)后, γ 增量超过标准限值174 nGy/h的下限为262.3 nGy/h, 歙县工作区 γ 辐射水平超限值区域面积约为6.0 km²。石煤矿点集中分布区 γ 外照射引起的有效剂量为3.20 mSv/a, 氡子体内照射剂量为4.98 mSv/a, 总有效剂量为8.18 mSv/a; 与原野对照点比较, 石煤矿点附加剂量5.11 mSv/a。

浙江开化工作区 γ 辐射剂量率平均值为205 nGy/h, 属典型的天然辐射高背景场。调查区内地表 γ 辐射水平呈现明显的不均衡特征, 在调查区北东缘与西南角分布较多已废弃的小型石煤矿点, 形成两个 γ 剂量率高值场中心(图3)。矿区高值中心 γ 剂量率为1514 nGy/h, 扣除歙县工作区 γ 辐射本底(72.3 nGy/h)及宇宙射线的响应(12.9 nGy/h)后, γ 增量超过标准限值174 nGy/h的下限为259.2 nGy/h, 开化工作区 γ 辐射水平超限值区域面积超过3.0 km²。石煤矿点中心区 γ 外照射引起的有效剂量高达9.28 mSv/a, 氡子体内照射剂量为1.70 mSv/, 总有效剂量为10.98 mSv/a; 与原野对照点比较, 石煤矿点中心附加剂量8.45 mSv/a。

江西修水石煤矿区的 γ 剂量率分布明显受地层的控制, 石煤矿区的 γ 辐射剂量率等值线呈现“向斜

图2 安徽歙县含石煤岩系 γ 辐射空气吸收剂量率等值图Fig.2 Contour of γ radiation dose rate in stone coal-bearing strata in Shexian, Anhui

式”展布特征(图4),高值区集中在测区南北两侧的石煤层或炭质泥岩分布带,而中部的碳酸盐岩系 γ 辐射剂量率较低。石煤矿点集中分布区的 γ 剂量率范围为242~1179 nGy/h,均值可达662 nGy/h,石煤矿点 γ 剂量率均值是南北两侧对照点的3.0倍。扣除修水工作区 γ 辐射原野本底值(143 nGy/h)及仪器对宇宙射线的响应(12.9 nGy/h)后, γ 增量超过标准限值174 nGy/h的下限为429.9 nGy/h,修水工作区 γ 辐射水平超限值区域面积超过8.0 km²。石煤矿点集中分布区 γ 外照射引起的有效剂量为7.22 mSv/a,氡子体内照射剂量为2.27 mSv/a,总有效剂量为9.49 mSv/a;与原野对照点比较,石煤矿点集中分布区附加剂量5.94 mSv/a。

江西上饶工作区 γ 辐射空气吸收剂量率在石煤矿集中分布的煌固—更坞、大骆村—张家山形成两个明显的串珠状高值场(图5),其中煌固—更坞一带的高场区范围更大、强度更高,全区 γ 剂量率测量

值最高点1164 nGy/h就分布在此处。扣除八都工作区 γ 辐射本底及仪器对宇宙射线的响应后, γ 增量超过标准限值174 nGy/h的下限为243.8 nGy/h,八都工作区 γ 辐射水平超限值区主要集中在煌固镇—更坞及张家山—大骆村两块区域,主要集中于矿区附近,总面积约为17.69 km²,超限值区内石煤矿点分布密集。石煤矿点集中分布区 γ 外照射引起的有效剂量为0.76 mSv/a,氡子体内照射剂量为3.17 mSv/a,总有效剂量为3.93 mSv/a。与原野对照点比较,江西上饶八都石煤矿点集中分布区附加剂量2.43 mSv/a,其中 γ 外照射途径占附加剂量的7%,吸入氡及子体途径占附加剂量的93%。

5 结论

本次研究基于野外天然放射性监测与室内核素含量分析,调查评价华东地区典型煤田空气、固体、水体、植物等介质的天然放射性水平,反映了华

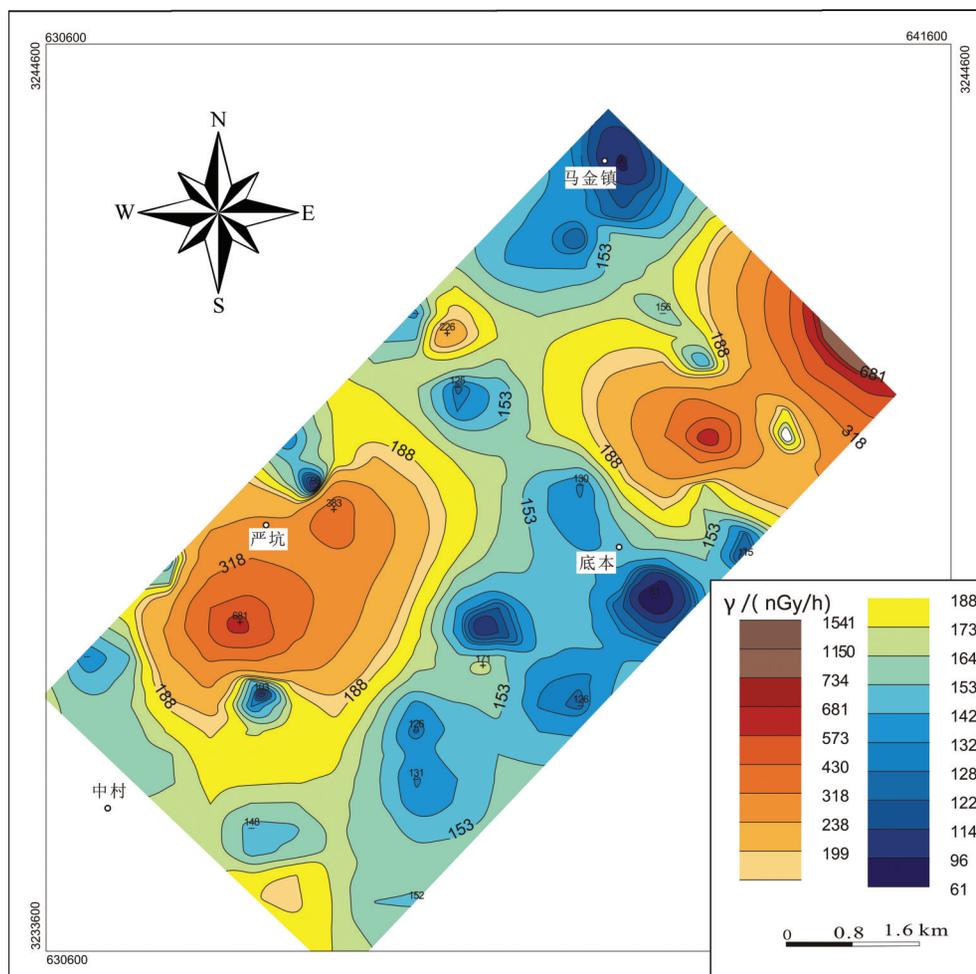


图3 浙江开化含石煤岩系 γ 辐射空气吸收剂量率等值图

Fig.3 Contour of γ radiation dose rate in stone coal-bearing strata in Kaihua, Zhejiang

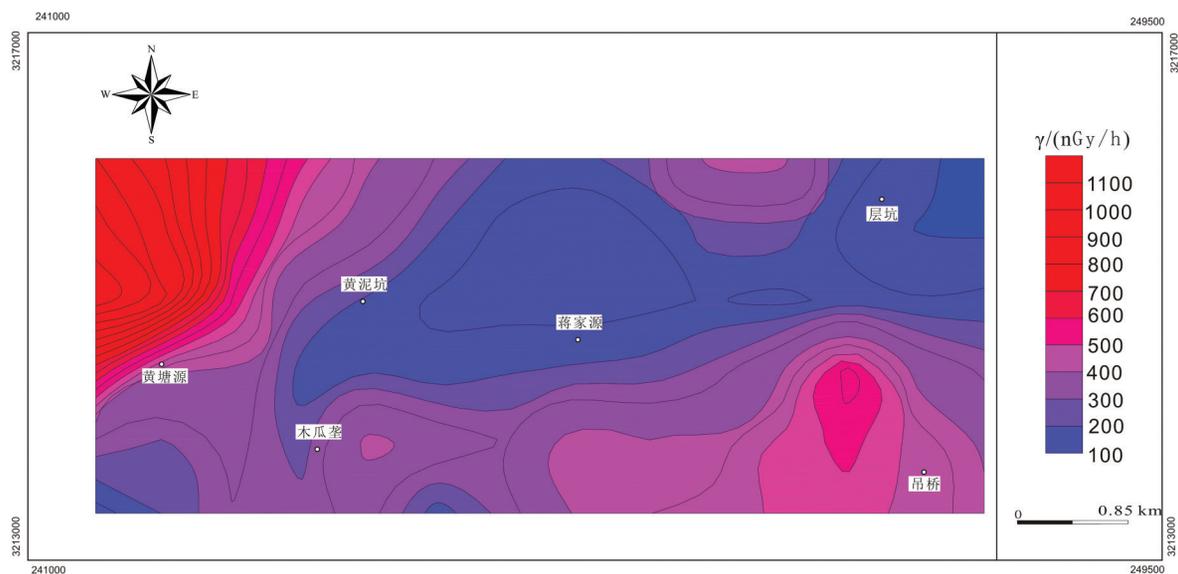


图4 江西修水含石煤岩系 γ 辐射空气吸收剂量率等值图

Fig.4 Contour of γ radiation dose rate in stone coal-bearing strata in Xiushui, Jiangxi

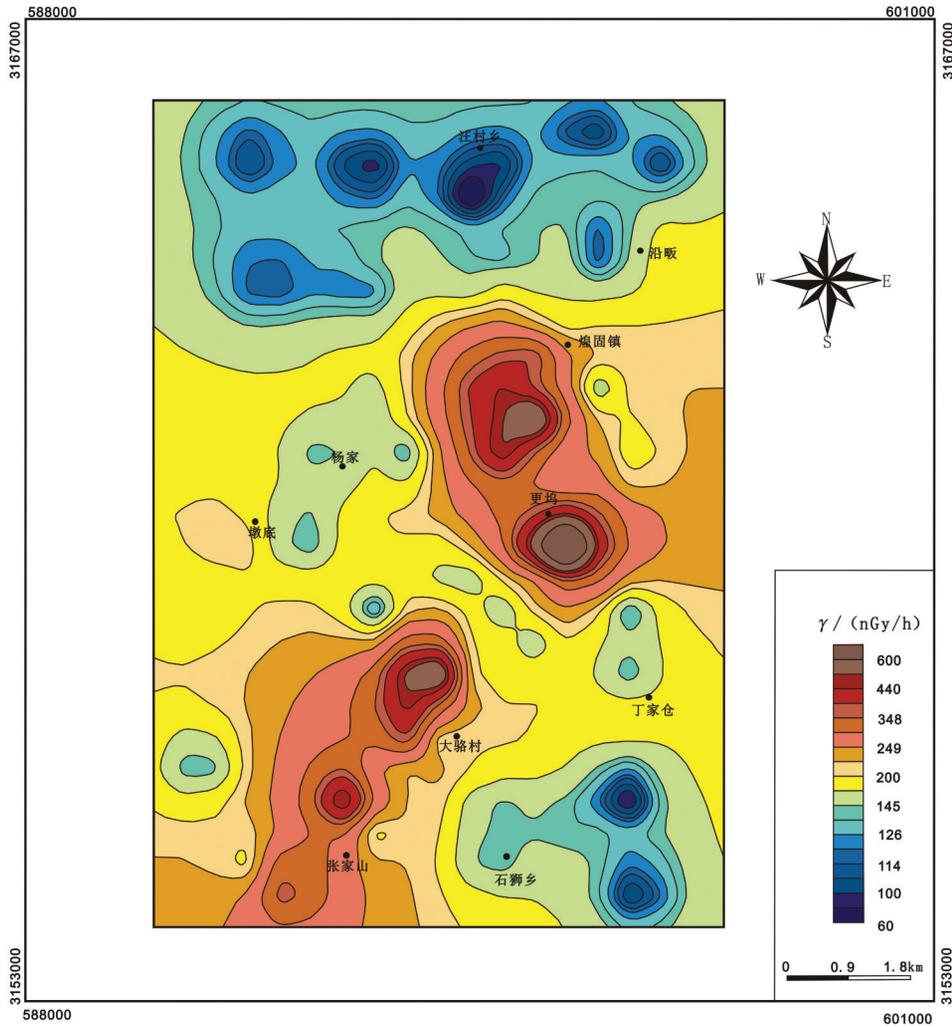


图5 江西上饶含石煤岩系 γ 辐射空气吸收剂量率等值图
 Fig.5 Contour of γ radiation dose rate in stone coal-bearing strata in Shangrao, Jiangxi

东地区当前含煤岩系放射性环境的基本现状。

(1)华东地区赋存于石炭系、二叠系的普通煤田与赋存于寒武系的石煤矿区存在不同的核素地球化学背景,呈现显著差异的天然放射性水平。普通煤田矿区原煤、煤矸石、土壤、岩石等固体介质样品核素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 含量处于正常水平;石煤矿区的固体介质样品的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 核素富集明显,具有更为显著的空间变异性。

(2)华东地区普通煤田地表 γ 辐射剂量率整体处于正常本底水平范围,空气氡浓度、土壤氡析出率、 γ 外照射吸收剂量均未超过标准限值。石煤分布带地表 γ 辐射剂量率属于整体放射性高值区,石煤矿区公众所受天然辐射主要源自 γ 外照射与空气氡子体吸入途径;监测矿区居民源于 γ 外照射引起

的吸收剂量均超过国际标准限值 1 mSv/a ,总有效剂量均超过了 2 mSv/a ,部分石煤矿点 γ 辐射有效剂量超过中国标准限值 5 mSv/a 。

(3)华东地区普通煤田矿区水体核素含量总体上处于正常水平,植物样核素比活度较低,不存在放射性污染。石煤矿区的地下水、建材、植物等介质出现零星的放射性污染。石煤矿区的天然放射性水平较高,矿区公众受到高剂量辐射,存在放射性污染环境的潜在风险,应加强石煤矿区放射性环境监测。

References

CGS (China Geological Survey). 2014. Quality Assurance Specification for Laboratory of Radioactive Mineral Analysis and

- Testing (EJ/T 751-2014) [S]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Chałupnik S, Wysocka M, Janson E, Chmielewska I, Wiesner M. 2017. Long term changes in the concentration of radium in discharge waters of coal mines and Upper Silesian rivers [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 177:117-123.
- Chen Shizhong, Yang Jingsui, Zhang Zeming, Liu Fulai, Li Tianfu, Qiu Haijun, Niu Yixiong, Wang Wenxian, Xu Haijun. 2005. Natural gamma-ray logging in the main hole (100-2000 m) of the Chinese continental scientific drilling project and its significance [J]. *Geology in China*, 32(2): 239-248 (in Chinese with English abstract).
- CNIC (China Nuclear Industry Corporation). 1995. Evaluation Requirements for the Environmental Impact of Uranium Geological Radiation Environment (EJ/T 977-1995) [S]. Beijing: China Atomic Energy Press (in Chinese).
- Galhardi J A, Garciatenorio R, Bonotto D M, DãAz F I, Mottaet J G. 2017. Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U- rich coal mining activities in Brazil [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 177:37-47.
- Huang Wenhui, Tan Xiuyi. 2002. Uranium, Thorium and other radionuclides in coal of China [J]. *Coal Geology of China*, 14 (Supp.): 55-63 (in Chinese with English abstract).
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards[R]. International Atomic Energy Agency, Austria, Vienna:1-436.
- Jiang Rangyun. 2007. Survey of radioactive level and radiation dose to the miner in Zhejiang bone-coal mine[J]. *Radiation Protection*, 27 (3): 163-170, 187 (in Chinese with English abstract).
- Křibek B, Sracek O, Mihaljevič M, Kněsl L, Majer V. 2018. Geochemistry and environmental impact of neutral drainage from an uraniumiferous coal waste heap [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 191: 1-21.
- Liu Fudong, Liao Haitao, Wang Chunhong, Chen Ling, Liu Senlin. 2006. Database of nuclide content of coal and gangue in Chinese coal mines [J]. *Radiation Protection*, 26(6): 362-366 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fudong, Pan Ziqiang, Liu Senlin, Chen Ling, Wang Chunhong, Liao Haitao, Wu Yihua, Wang Nanping. 2007. Investigation and analysis of the content of natural radionuclides at coal mines in China [J]. *Radiation Protection* 27(3): 171-180 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qiang, Jin Hongtao, Zhu Wei, Tian Hui, Zhang Sen, Ju Nan, Zhang Yan, Yan Xiaoming. 2020. Study on the Comprehensive Evaluation Method of Geo environmental Radioactivity of Coal fields in Northeast China [J]. *Geology and Resources*, 29(4): 388-396.
- Luo Guozhen, Huang Jiaju, He Zhenyun. 1995. Natural Radioactivity Level in China [M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 1-716 (in Chinese).
- Lü Huijin. 2003. Radioactive pollution in bone coal mining areas in western Zhejiang [J]. *Geological bulletin of China* 22(9): 725-728 (in Chinese with English abstract).
- Pan Ziqiang, Liu Yanyang. 2011. Enhanced natural radiation exposure enhanced by human activity—the largest contributor to the Chinese population dose [J]. *Radiation Protection*, 31(6): 323-327 (in Chinese with English abstract).
- SEPA (State Environmental Protection Agency).1993. Specification for Measurement of Dose Rate of Ambient Ground Gamma Radiation (GB/T 14583-93) [S]. Beijing: China Atomic Energy Press (in Chinese).
- Skoko B, Marović G, Babić D, Šoštarić M, Jukić M. 2017. Plant uptake of ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb and ⁴⁰K from a coal ash and slag disposal site and control soil under field conditions: A preliminary study [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 172: 113-121.
- UNSCEAR (United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation[R]. New York,1-156.
- Wang Chunhong, Pan Ziqiang, Liu Senlin, Yang mingli, Shang Bing, Zhuo Weihai, Ren Tianshan, Xiao Detao, Yang Weigeng. 2014. Investigation on indoor radon levels in some parts of China [J]. *Radiation Protection* 34(2): 65-73 (in Chinese with English abstract)
- Wang Guokun, Xi Chaozhuang, Liu Kaikun, Li Yantao. 2017. Assessment of coal-bearing strata uranium mineralization and impact on environment in Guizhou Province [J]. *Coal Geology of China*, 29(3):58-61 (in Chinese with English abstract).
- Wang Honghai, Zhang Linxi, Xu Naizheng, Wei Xinxiang, Dou Xiaopin. 2017. Investigation and evaluation of radioactive environment in a bone coal mine area in Xiushui County, Jiangxi Province [J]. *Radiation Protection*, 37(6): 476-482 (in Chinese with English abstract).
- WHO (World Health Organization). 2011. Guidelines for Drinking-Water Quality (Fourth Edition)[R]. The World Health Organization, Geneva, Switzerland,1-564.
- Wufuer R, Song W, Zhang D, Pan X L, Gadd G M. 2018. A survey of uranium levels in urine and hair of people living in a coal mining area in Yili, Xinjiang, China [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*,189:186-174.
- Xiong Zhengwei, Yu Yilin, You Meng, Guo Chenglin, Zhou Shukui, Yu Zhenxun. 2007. Analysis of environment contamination from concomitant radioactivity of coal mine source [J]. *Journal of China Coal Society*, 32(7):762-766 (in Chinese with English abstract).
- Xu Naizheng, Wei Xinxiang, Kuang Fuxiang, Zhang Linxi, Liu Hongyin. 2018. Study on natural radioactivity level of stone coal-bearing strata in East China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 77:

- 726.
- Ye Jida, Kong Linli, Li Ying, Zhang Liang, Jiang Shan, Wang Ming, Liu Hongshi, Zhu Jinqiu, Shi Jinhua, Chen Changhua, Zhang Zhengguo. 2004a. Study of radioactivity effect of mining and utilizing bone-coal mine on environment [J]. Radiation Protection 24(1): 1-23 (in Chinese with English abstract).
- Ye Jida, Zhu Li, Wu Zunmei. 2004b. Natural Radioactivity Level in Bone-coal Mines in Zhejiang Province [J]. Radiation Protection Bulletin, 24(4):21-24 (in Chinese with English abstract).
- Yue Yumei, Song Gang, Zhang Zhiqiang, Fu Yingjie, Chen Diyun. 2011. Studies on natural radioactivity of soil in North of Guangzhou [J]. China Environmental Sciences, 31(4), 657-661 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen, Liu Fulai, Zhang Zeming, Yang Jingsui, Xu Zhiqin. 2005. Vertical distribution characteristics and origin of radiogenic heat-producing elements (HPE) in the first 2000 m of the main hole of the CCSD Project [J]. Geology in China, 32(2): 230-238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Pan Guitang, He Wenhong, Xiao Qinghui, Xu Yadong. 2015. New division of tectonic-strata super region in China [J]. Earth Science 40 (2): 206-233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiqiang, Chen Diyun, Zhu Gang, Yue Yumei. 2011. Uptake of radionuclides from soil to plant and the discovery of ^{226}Ra , ^{232}Th Hyperaccumulator [J]. Chinese Journal of Environmental Science 32(4):1159-1163 (in Chinese with English abstract).
- 陈世忠, 杨经绥, 张泽明, 刘福来, 李天福, 邱海峻, 牛一雄, 王文先, 徐海军. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔100~2 000 m 岩心自然伽马测量及其地质意义[J]. 中国地质, 32(2): 239-248.
- 国家环境保护局. 1993. 环境地表 γ 辐射剂量率测定规范(GB/T 14583-93)[S]. 北京: 中国原子能出版社.
- 黄文辉, 唐修义. 2002. 中国煤中的铀、钍和放射性核素[J]. 中国煤田地质, 14(增刊):55-63.
- 姜让荣. 2007. 浙江省部分石煤矿放射性水平和矿工剂量调查[J]. 辐射防护, 27(3):163-170, 187.
- 刘福东, 廖海涛, 王春红, 陈凌, 刘森林. 2006. 全国煤矿中煤、煤矸石中核素含量数据库[J]. 辐射防护, 26(6):362-366.
- 刘福东, 潘自强, 刘森林, 陈凌, 王春红, 廖海涛, 武奕华, 王南萍. 2007. 全国煤矿中煤、矸石天然放射性核素含量调查分析[J]. 辐射防护, 27(3):171-180.
- 刘强, 金洪涛, 朱巍, 田辉, 张森, 鞠楠, 张妍, 闫晓明. 2020. 东北地区煤田地质环境放射性综合评价方法研究[J]. 地质与资源, 29(4): 388-396.
- 罗国桢, 黄家矩, 何振芸. 1995. 中国环境天然放射性水平[M]. 北京: 中国原子能出版社, 1-716.
- 吕惠进. 2003. 浙西石煤产区放射性污染及防治对策[J]. 地质通报, 22(9):725-728.
- 潘自强, 刘艳阳. 2011. 人为活动引起的天然辐射照射的增加[J]. 辐射防护, 31(6):323-327.
- 王春红, 潘自强, 刘森林, 杨明理, 尚兵, 卓维海, 任天山, 肖德涛, 杨维耿. 2014. 我国部分地区居室氡浓度水平调查研究[J]. 辐射防护, 34(2):65-73.
- 王国坤, 息朝庄, 刘开坤, 李艳桃. 2017. 贵州含煤岩系含铀性对环境的影响评价[J]. 中国煤炭地质, 29(3):58-61.
- 王红海, 张麟熹, 许乃政, 魏信祥, 窦小平. 2017. 江西省修水县石煤矿区放射性环境调查与评价[J]. 辐射防护, 37(6):476-482.
- 熊正为, 喻亦林, 游猛, 郭成林, 周书葵, 余振勋. 2007. 云南省煤的放射性污染调查分析[J]. 煤炭学报, 32(7):762-766.
- 叶际达, 孔玲莉, 李莹, 张亮, 江山, 万明, 刘鸿诗, 朱锦秋, 施锦华, 陈昌华, 张政国. 2004a. 五省放射性伴生石煤矿开发和利用对环境的影响研究[J]. 辐射防护, 24(1):1-23.
- 叶际达, 朱力, 吴宗梅. 2004b. 浙江省放射性伴生石煤矿区天然放射性水平调查[J]. 辐射防护通讯, 24(4): 21-24.
- 岳玉美, 宋刚, 张志强, 富英杰, 陈迪云. 2011. 广州市北部土壤天然放射性水平研究[J]. 中国环境科学, 31(4):657-661.
- 曾令森, 刘福来, 张泽明, 杨经绥, 许志琴. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔100~2000 m 放射性产热元素的垂向分布特征及其成因[J]. 中国地质, 32(2): 230-238.
- 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 肖庆辉, 徐亚东. 2015. 中国构造-地层大区划分新方案[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(2), 206-233.
- 张志强, 陈迪云, 朱刚, 岳玉美. 2011. 放射性核素土壤-植物吸收与钍、镭富集植物的发现[J]. 环境科学, 32(4):1159-1163.
- 中国地质调查局. 2014. 放射性矿产地质分析测试实验室质量保证规范(EJ/T 751-2014) [S]. 北京: 地质出版社.
- 中国核工业总公司. 1995. 铀矿地质辐射环境影响评价要求(EJ/T 977-1995)[S]. 北京: 中国原子能出版社.

附中文参考文献