

东北地区煤田地质环境放射性综合评价方法研究

刘 强¹, 金洪涛¹, 朱 巍¹, 田 辉¹, 张 森¹, 鞠 楠¹, 张 妍², 闫晓明²

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁省地质矿产研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110032

摘 要: 通过筛查天然放射性测井资料获取地层连续的放射性数据, 以异常层与煤层的位置关系确定煤层型、煤间型、煤上型、煤下型 4 种异常类型, 建立了一套应用于煤田原生地质环境放射性综合评价方法。经过对评价方法和评价结果的分析, 认为东北地区巴彦山煤田、呼和诺尔煤田、阜新煤田、平庄煤田等地质环境放射性明显, 在开发中应注意放射性核素迁移造成的环境影响。

关键词: 煤田; 地质环境; 放射性; 综合评价; 东北地区

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.04.013

STUDY ON THE COMPREHENSIVE EVALUATION METHOD OF GEOENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY OF COALFIELDS IN NORTHEAST CHINA

LIU Qiang¹, JIN Hong-tao¹, ZHU Wei¹, TIAN Hui¹, ZHANG Sen¹, JU Nan¹, ZHANG Yan², YAN Xiao-ming²

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Shenyang 110032, China

Abstract: By screening the natural radioactive logging data to obtain the continuous radioactivity data of strata, according to the position relation between anomaly layer and coal seam, the paper recognizes 4 types of anomalies, including coal seam, inter-coal seam, above-coal seam roof and below-coal seam floor, and establishes a comprehensive evaluation method for radioactivity in primary geological environment of coalfields. Through the analysis of evaluation method and result, it is believed that the geoenvironment of Bayanshan coalfield, Huhenuoer coalfield, Fuxin coalfield and Pingzhuang coalfield in Northeast China are obviously radioactive, thus the exploitation should attach importance to the environmental impact of radionuclide migration.

Key words: coalfield; geoenvironment; radioactivity; comprehensive evaluation; Northeast China

0 引言

含煤岩系的放射性研究起始于 20 世纪 50 年代初, 在 1955 和 1958 年日内瓦召开的第一、第二届和平利用原子能会议上报告了众多的煤和其他有机质岩石赋存铀的研究成果。这个时期是人们研究煤中铀的高

潮期, 特别是我国周边国家, 如俄罗斯、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦研究较多。其后我国煤田系统也开展了煤中铀的普查, 在西北侏罗纪煤田、云南古近纪-新近纪煤田也都发现富含铀的煤^[1], 这一时期多注重煤和其中放射性铀的资源属性。

收稿日期: 2020-02-06; 修回日期: 2020-04-20。编辑: 张哲。

基金项目: 中国地质调查局国土资源调查项目“东北地区铀矿调查选区及含煤岩系放射性地质环境调查”(项目编号 DD20160131)。

作者简介: 刘强(1982—), 男, 高级工程师, 从事水文地质、地质矿产调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail://lq6022@163.com

国际上最早注意到煤炭燃烧伴随着放射性环境影响的,是 1964 年 Eisenbud 和 Petrow 的研究报告,他们率先提出了化石能源的燃烧能够释放大量的天然放射性元素. Bellis 等^[2]测量了燃煤电厂附近树皮中的铀含量,发现样品中铀含量都较高,进一步同位素分析表明,样品中铀含量升高是由燃煤电厂排放物所致. 我国自 1980 年代初,核工业、电力、环保、工业卫生等部门相继开展了对煤炭燃烧和综合利用的放射性环境影响的调查研究. 2006~2009 年,国家环境保护部组织开展了第一次全国污染源普查,指出我国伴生放射性污染源企业数量较多的是煤(含煤矸石)、铁和铅锌^[3]. 综合多种研究成果认为:富含放射性核素的含煤岩系开采,容易排放出放射性氡气以及总 α 超标的矿井水和地下水;煤经过燃烧后,其中铀几乎全部富集到灰渣中,对长时间工作的生产作业人员及周边人员产生附加 γ 照射和氡气子体的照射,从而影响人们的身体健康^[4-5].

过往的研究多集中于富铀煤燃烧后,其放射性核素迁移、富集规律,而对区域原生地质环境放射性分析极少. 对区域含煤岩系原生地质环境开展放射性研究,预测开采后的放射性环境影响,既能对未开采煤矿进行指导,为生产作业提出预防辐射防护措施,又能引起已开采的高放射性煤田的重视,指导后续做好地表放射性现状调查. 本次研究依托“东北地区铀矿调查选区及含煤岩系放射性地质环境调查”项目,通过筛查天然放射性测井资料获取地层连续的放射性数据,建立了一套应用于煤田原生地质环境放射性的综合评价方法,并对东北地区主要煤田地质放射性进

行总结和分析,取得一系列有意义的结果.

1 研究区概况

研究区位于中国东北部,包含辽宁、吉林、黑龙江三省及内蒙古自治区东部三市一盟. 区内煤田地质调查始于清末,有记录的地质钻探始于 1905 年,抚顺、本溪、阜新、北票、鹤岗、穆棱等重要煤矿在 1949 年前已开采. 新中国成立后,在这些煤田上投入了大量的勘查工作,但煤田天然伽玛测井数据相对缺乏. 随着勘探技术的发展,天然伽玛测井技术逐渐应用到煤田勘查中,20 世纪 70 年代以前的勘探测井,对天然伽玛测井不做要求,仅有个别孔进行了天然伽玛测量,80 年代以后,随着放射性测井技术的进步,利用天然伽玛测井可以更准确地判定煤层位置,同时新的《煤田测井规程》开始施行,煤田勘查钻孔多进行了天然伽玛全孔测量工作^[6]. 海拉尔、铁法、亮中、勃利等煤田天然伽玛测井资料较为丰富,这为含煤岩系地质环境放射性研究工作提供了宝贵的基础数据.

为了便于分析总结,笔者对面积小于 100 km² 的煤田进行了适当的删减和合并,最终归并煤田 136 个,其中辽宁省 27 个,吉林省 28 个,黑龙江省 49 个,内蒙古自治区东部 32 个(见表 1).

2 地质环境放射性综合评价指标体系构建

2.1 数据来源及筛查方法

岩石的天然伽玛强度主要是由铀系、钍系和放射性同位素 ⁴⁰K 决定的. 从测量方法上分析,所有煤中都或多或少含有天然放射性核素,其含量变化很大,即

表 1 东北地区主要煤田统计表
Table 1 Statistics of major coalfields in Northeast China

地区	数量	煤田名称
辽宁	27	亮中-古榆树、金长、铁法、彰武、阜新、八道壕、三台子、义县、西丰、大甸子、抚顺、沈北、永乐、北票、和尚沟、建昌、凌源、南哨-杨树沟、南票、杨家杖子-虹螺蛃、马架子-暖河子、草河掌、田师傅、凤城、恒仁、本溪、红阳、董家沟
吉林	28	白城-万红、瞻榆、四平-双辽、双城堡-刘房子、营城-羊草沟、榆树、辽源、长白、双阳、蛟河、安图、延吉、和龙、凉水、珲春、春化、敬信、三合、屯田营-春阳、伊通、舒兰、梅河-桦甸、敦化、边沿-后沈家、三棵榆树-衫松岗、新开岭-三道沟、浑江、烟筒沟-漫江
黑龙江	49	漠河、霍拉盆、欧浦、呼玛、大西江、龙江、李三店、颜家沟、山泉、西岗子、四季屯、红绣沟、黑宝山-木耳气、依龙、建兴、翠岭、东兴、木兰、凤山、方正断陷、胜利断陷、山河断陷、嘉荫、新河口、延兴、二九〇、鹤岗、汤原断陷、绥滨-集贤、七星河、双鸭山、双桦、小城子-万金山、小营盘、迎门山、勃利、桦南、青山、四海店、兴凯湖、虎林、鸡西、鸡东、林口、五林、东宁、老黑山、朝阳-大和镇、南横林子
内蒙古东部	32	扎赉诺尔、巴彦山、呼和诺尔、得尔布、开放山、三角地、西胡里吐、特兰图、五九、莫拐-石瓦鲁、大雁、免渡河、胡列也吐、大杨树、忙牛海、黄花山、联合屯、温都花、塔布花、宝龙山、双辽、吉尔嘎朗、绍根、当铺地、永丰、元宝山、平庄、四龙、亿合众、沙力好来、乌尼特、拉布达林

使从同一煤矿的同一层煤里取样, 分析结果也可能有较大差别。自然伽玛能谱测井测量的伽玛射线是 ^{40}K 放射的 1.46 MeV 伽玛射线、铀系 ^{238}U 放射的 1.76 MeV 伽玛射线、钍系 ^{232}Th 放射的 2.62 MeV 伽玛射线的总和^[7-8]。勘探孔的天然伽玛测井曲线具有连续的测量值, 对放射性异常定性具有显著优势, 因此分析采用测井天然伽玛测量值为放射性强度指标。

本次研究的测井数据来自于辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古地质资料馆的煤田勘查资料。在查阅测井资料时发现, 在放射性测井中各施工方使用的测井单位各不相同, 有伽马(γ)、纳库/千克·小时($\text{nC/kg}\cdot\text{h}$)、 pA/kg 、API、CPS 等。这些单位的含义及其相互关系: $1\ \gamma=0.258\ \text{nC/kg}\cdot\text{h}=7.17\times 10^{-2}\ \text{pA/kg}$, API 是刻度单位, 以北美大陆中部地区普通泥岩的读数为 100 API 单位。CPS 是指仪器测量样品发射出粒子的计数, 在仪器未标定情况下只能定性不能定量。测井资料筛查完毕后再统一将不同度量单位换算为伽马(γ)表示。参考《我国主要盆地煤铀等多矿种综合调查评价计划项目工作技术要求(第三版)》中 6.1.5 节的要求, 将钻孔自然伽玛测井曲线中大于 50 γ (或 3.5 pA/kg 、150 API、12.6 $\text{nC/kg}\cdot\text{h}$) 的划分为煤层含铀性(放射性)异常层。放射性测井采用 CPS 或其他单位时, 采用“先定性后定量”的原则, 先以伽玛强度超过 3 倍本底值确定为放射性异常, 再截取异常峰值数据。筛查完毕记录异常孔坐标, 异常段岩性、深度、厚度、与煤层关系, 度量单位等。

2.2 评价方法及指标选取

笔者认为对这种大范围内区域评价, 任何单一勘查钻孔或者单一层位的评价都无法全面反映整个煤田的地质环境放射性, 需要选用多层位多指标的综合评价法对煤田的地质环境放射性进行评价。现在常用的综合评价方法里有综合指数法、层次分析法、模糊评价法, 多元统计分析等, 模糊综合评价结果是一个矢量, 而不是一个点值, 包含的信息比较丰富, 可以比较准确地刻画被评价对象。因此本文选择模糊综合评价作为评价手段^[9-11]。

煤田原生地质环境放射性评价目的为查明未经开采扰动情况下的含煤岩系的放射性状态, 并对开采中和开采后会对人类身体健康产生潜在影响做出判断, 因此在评价指标上要同时考虑放射性强度、异常来源、

影响方式、地质背景、置信度等。

含煤岩系为一套含有煤层或煤线的沉积岩系, 是一个立体的概念, 包含煤上、煤层及煤下的整体。以往文献对含煤岩系的放射性异常类型划分没有统一标准。笔者与天津、成都、西安、武汉、南京 6 个地质调查中心同行多次研讨后一致认为, 根据放射性异常层与煤层的位置关系、煤层开采时对异常层的扰动以及开采后对人类环境的影响, 以异常层与煤层的位置关系可确定 4 种异常类型。1) 放射性异常层岩性为煤, 定为煤层型异常; 2) 当煤层为多层, 放射性异常位于两层中间且相邻两煤层之间厚度小于 10 m 时, 定为煤间型异常; 3) 放射性异常位于煤层顶板及其上 0~20 m, 定为煤上型异常; 4) 放射性异常位于煤层底板及其下 0~20 m, 定为煤下型异常。

钻孔数以同一煤田内不同勘查报告中的具有天然伽玛测井的钻孔总和进行统计, 可表示煤田评价结果的可靠度, 钻孔数越多, 评价结果越可靠。异常率是异常钻孔占每个煤田钻孔数的比例, 可以表征高放射性地层的范围。异常率高, 则放射性异常的地层范围大, 反之则小。

一般情况下, 煤本身不含放射性物质。沉积岩中所含的放射性物质来自岩浆岩^[12-13], 煤层的放射性物质主要是由成煤物质吸附次生放射性物质引起的^[14], 还原环境比氧化环境更容易聚积次生放射性物质。地层年代决定了不同的沉积环境、岩类、物源上的差别, 容易造成地层中的放射性强度差异。含煤时代可以表征煤田的沉积时代, 高放射性岩浆岩风化再沉积, 利于提高煤田放射性。

综上所述, 采用钻孔数、钻孔异常率、煤上异常孔、煤上放射性强度、煤层异常孔、煤层放射性强度、煤间异常孔、煤间放射性强度、煤下异常孔、煤下放射性强度、含煤时代共 11 项指标。经筛查东北地区 136 个煤田后, 取得 84 个煤田 12915 孔天然伽玛测井数据, 其中 43 个煤田具有放射性异常, 具体统计指标见表 2。

2.3 评价公式及参数

选用模糊综合评价计算公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^n W_i \times r_i \quad (1)$$

式中: I 为煤田地质环境放射性综合指数; W_i 为第 i 个因子的权重; r_i 为第 i 个因子的隶属度; n 为评价因

表 2 煤田天然放射性信息统计表
Table 2 Natural radioactivity statistics of coalfields

煤田名称	钻孔数	异常率/%	煤上异常孔	煤上强度/ γ	煤层异常孔	煤层强度/ γ	煤间异常孔	煤间强度/ γ	煤下异常孔	煤下强度/ γ	含煤时代
亮中-古榆树	194	18.04	33	197					2	112.59	K
金长	266	11.28	25	136					5	90	K
铁法	577	10.75	62	153							K
彰武	59	3.39	2	75.05							K
阜新	248	18.95	12	240	15	260	6	145.83	14	172.67	K
八道壕	46	19.57	3	235.63	4	522	1	61.6	1	106.88	K
义县	87	2.30	2	56.64							K
北票	18	5.56							1	145	J
南票	89	10.11	6	173.86					3	80.57	P
马架子暖河子	12	41.67	3	82.5			2	100.08			PJ
草河掌	27	29.63	2	70	3	61			3	73	P
红阳	157	24.20	9	134	1	60	5	80	23	247.07	P
营城羊草沟	110	30.00	32	250			1	83.33			K
双阳	280	3.21	7	202	2	115					TJK
和龙	19	5.26			1	117					K
凉水	78	32.05			2	84	1	86.67	22	200	E
珲春	153	1.31							2	60	E
新开岭三道沟	58	13.79	4	220					4	133.33	K
浑江	172	20.93	25	200	3	86.67	3	143.33	5	100	CPJK
西岗子	65	1.54	1	106.67							K
汤原断陷	10	30.00	1	64.29					2	88.57	E
绥滨-集贤	726	0.69	2	69.04	2	136.12			1	66.75	K
双鸭山	257	1.95	2	67.2					3	70	K
小城子万金山	67	1.49							1	71.14	K
勃利	1553	2.70	13	259	4	96.07	1	60	24	756	K
青山	64	12.50							8	91.54	K
四海店	48	4.17	1	50					1	63.4	K
兴凯湖	6	50.00							3	54.14	E
鸡西	710	1.13	1	60					7	112.31	K
鸡东	634	1.42	3	135.09					6	198.4	E
东宁	76	10.53	1	66.67	3	67.3			4	78.62	K
扎赉诺尔	51	13.73	2	76			2	54.8	3	120.6	K
巴彦山	2849	17.80	61	353.03	444	1060	2	170			K
呼和诺尔	948	7.70	34	564.71	16	247.43	12	224.29	11	236.26	K
开放山	53	13.21	2	112.91	4	95.68			1	52	K
西胡里吐	19	21.05	1	155			2	518.4	1	55	K
五九	281	1.42					3	62.43	1	52	K
拉布达林	75	4.00					1	56.14	2	103.86	K
绍根	47	31.91	15	114.29							K
长胜	3	66.67	1	50			1	50			K
元宝山	10	20.00	1	50.4			1	50			K
平庄	97	26.80	14	171.43			10	82.99	2	59.53	K
四龙	33	21.21	5	145.4					2	78	K

子的总数目^[15-17]。

本评价为地质环境放射性，放射性强度和放射性异常率是评价中最主要的指标，异常率值为煤层、煤上、煤下和煤间的总异常率，设定其权重为 0.3；而放射性强度分别对不同地层分列，其权重和为 0.25；各层异常孔数表示异常多少，其权重和为 0.25；钻孔数和含煤时代作为辅助评价项，其权重分别为 0.1。

从异常层对人类健康影响的角度分析，高放射性煤层开采后会以煤或其燃烧后的产物对人类生活环境造成直接影响，对人类潜在影响程度非常大；煤间层放射性高异常，开采时有可能以矸石形式迁移到地表，或者对煤矿工人造成辐射影响，对人类潜在影响程度较大；煤上层放射性高异常，开采时会以矸石形式将顶板破坏，对人类潜在影响程度中等；煤下层放射性高异常，在开采时煤矿工人有可能受到辐射影响，对人类潜在影响程度较小。4 种类型占权重分别为煤层>煤间>煤上>煤下。

根据各个评价因子对于煤田放射性强弱的贡献程度，确定评价指标的权重，列于表 3。

表 3 综合评价参数表

Table 3 Parameters of comprehensive evaluation

评价指标	权重	x_1	x_2
钻孔数/个	0.10	3.00	500
钻孔异常率/%	0.30	0.69	31
煤上异常孔/个	0.05	1.00	23
煤上放射性强度/ γ	0.05	50.00	300
煤层异常孔/个	0.10	1.00	72
煤层放射性强度/ γ	0.10	50.00	430
煤间异常孔/个	0.075	1.00	6
煤间放射性强度/ γ	0.075	50.00	240
煤下异常孔/个	0.025	1.00	11
煤下放射性强度/ γ	0.025	50.00	253

东北地区主要经历了两期主要的岩浆岩活动——古生代兴蒙造山区构造运动强烈的岩浆活动和晚三叠世—早侏罗世岩浆活动强烈期。主要的陆相盆地形成于中生代，中酸性岩浆活动形成了富铀岩浆岩基底建造，为后来形成的中生代陆相盆地内铀成矿提供了丰富的铀源。东北地区主要成煤期为晚石炭世—早二叠世、晚三叠世—侏罗世、早白垩世、古近纪及新近

纪。因此晚于侏罗纪的成煤期具有更为丰富的放射性物源及稳定的沉积环境，确定含煤时代的隶属度 C 为 0，P 为 0，J 为 1，K 为 1，E 为 1。除含煤时代外的 10 项指标的隶属度以升型隶属度函数公式确定。

升型隶属度函数公式：

$$f(x)=\begin{cases} 1 & x_2 \leq x \\ (x-x_1)/(x_2-x_1) & x_1 \leq x < x_2 \\ 0 & x < x_1 \end{cases} \quad (2)$$

经分析每项指标，除几个煤田具有极大值外，主体数据集集中于 2 倍平均值以下。因此各指标 x_1 确定为异常煤田的最小值， x_2 以异常煤田的 2 倍平均值确定。

2.4 指标设置合理性分析

综合评价指标设置时一般强调指标间的独立性，但各评价指标间总会存在一定的相关性，综合评价时会影响评价结果的合理性，甚至会歪曲评价对象间的相对位置。因此建立指标时除考虑指标必要性之外，也应该通过权重调整、隶属度设置等消除数据之间的相关性。

理论上异常率是反映一个煤田放射性地质环境的重要指标，当钻孔数足够大时，异常率将反映一个煤田理论状态下的期望值。每个煤田拥有自己独有的异常率，不因钻孔数变化而变化。通过分析钻孔数与钻孔异常率的关系发现，总体上钻孔数与异常率相关系数为-0.21，相关性不显著；但钻孔数小于 20 个时，两者之间相关系数为-0.88，为明显负相关性（图 1a）；钻孔数大于 20 个时，两者之间相关系数为-0.14，相关性不显著（图 1b）。说明在异常存在的情况下，假如样本数不超过 20 个，异常率不能完全真实地反映煤田的放射性特征；钻孔异常率在钻孔大于 20 个的时候基本准确地反映煤田的实际情况。针对钻孔数量较少的时候存在异常率可靠性偏低的问题，引入钻孔数作为可靠性指标，反向消除了部分煤田钻孔偏少可能引起的评价偏差。

选用煤上、煤层、煤间、煤下共计 8 个指标对煤田的上中下地层放射性进行立体评价，分别代表不同地层放射性的两个关键特征数量和质量，能够较完整地反映煤田的地质环境放射性特征。但由于在平面分布上受限于资料丰富程度，还有大量的煤田缺乏评价数据。单项指标的隶属度以大于 2 倍平均值为 1，削弱了单项评价指标里的极大值对评价结果的影响，特别是

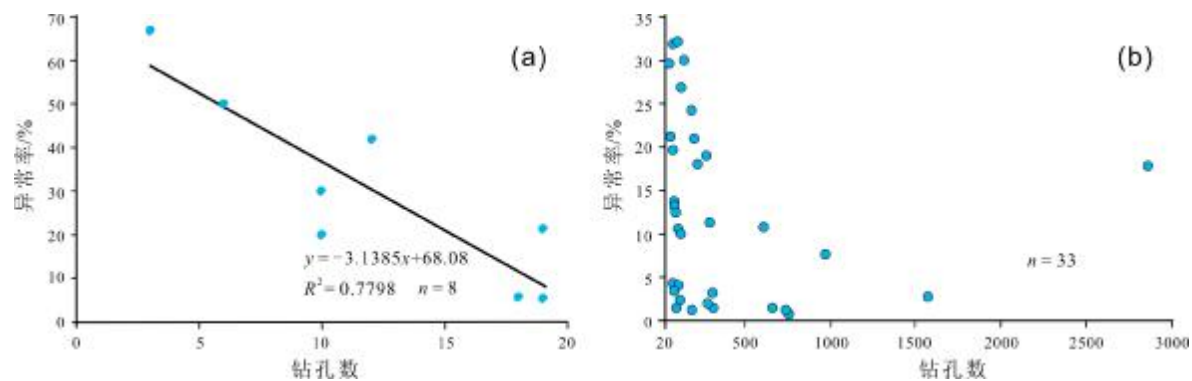


图 1 钻孔数与异常率关系图

Fig. 1 Relation between borehole numbers and the anomaly rate

个别煤田异常孔评价值过大。

3 结果与讨论

3.1 综合评价结果分析

按照模糊综合评价方法对相应的 11 个指标合理赋值后,计算其全部评价指标总和,根据累加和进行排序,累加和大者排序在前,表示煤田地质环境放射性特征明显(潜在环境危害大);反之,则煤田地质环境放射性特征较弱(潜在环境危害小)。各煤田综合评价结果见表 4。

根据评分将煤田地质环境放射性分为 4 级(图 2)。评分 ≥ 0.5 ,等级为极强; $0.35 \leq$ 评分 < 0.5 ,等级为强; $0.2 \leq$ 评分 < 0.35 ,等级为中等;评分 < 0.2 ,等级为弱。评

价结果,巴彦山、呼和诺尔、阜新、平庄、营城-羊草沟、浑江 6 个煤田地质环境放射性特征等级为极强,它们共同的特征为拥有较多的勘查钻孔和放射性异常钻孔,筛查的钻孔中有 3 层及以上的高放射性层位,同时放射性强度较高,其中勘查钻孔数最多的为巴彦山煤田达 2849 孔,呼和诺尔煤田具有煤上、煤层、煤间、煤下 4 层异常。凉水、绍根、八道壕、马架子-暖河子、红阳、西胡里吐等 12 个煤田地质环境放射性特征等级为强,在此等级煤田中至少有 4 项以上指标较为突出。四龙、金长、草河掌、新开岭-三道沟、元宝山等 14 个煤田地质环境放射性特征等级为中等。双鸭山、和龙、北票等 11 个煤田地质环境放射性特征等级为弱。

表 4 东北地区主要煤田放射性特征综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation results for the radioactivity characteristics of major coalfields in Northeast China

煤田	综合指数	煤田	综合指数	煤田	综合指数	煤田	综合指数
巴彦山	0.73	西胡里吐	0.42	元宝山	0.29	和龙	0.17
呼和诺尔	0.63	兴凯湖	0.41	扎赉诺尔	0.28	北票	0.16
阜新	0.62	汤原断陷	0.40	开放山	0.26	拉布达林	0.16
平庄	0.52	长胜	0.40	鸡东	0.26	南票	0.15
营城-羊草沟	0.51	亮中-古榆树	0.40	青山	0.25	彰武	0.14
浑江	0.51	铁法	0.37	双阳	0.24	四海店	0.14
凉水	0.48	勃利	0.36	东宁	0.23	珲春	0.14
绍根	0.45	四龙	0.34	绥滨-集贤	0.23	义县	0.14
八道壕	0.45	金长	0.34	鸡西	0.23	西岗子	0.13
马架子-暖河子	0.45	草河掌	0.31	五九	0.20	小城子-万金山	0.12
红阳	0.42	新开岭-三道沟	0.30	双鸭山	0.17		

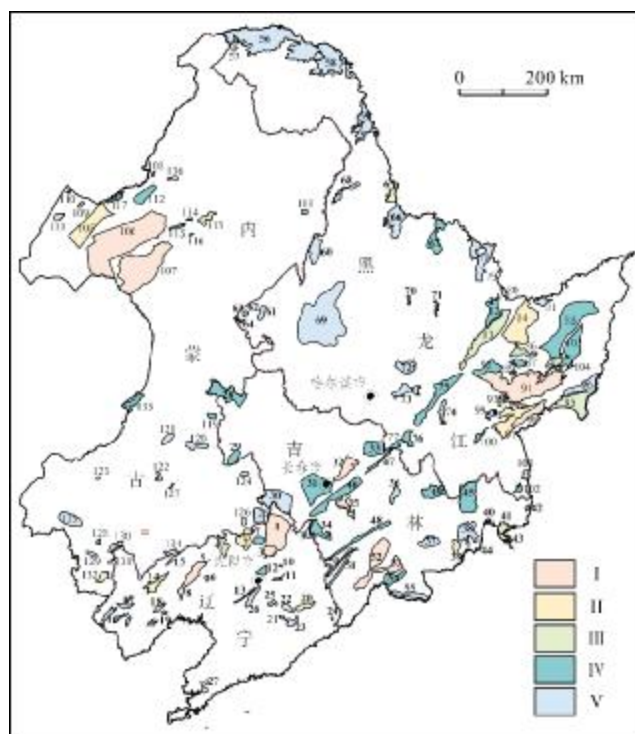


图2 东北地区主要煤田放射性强度分布图

Fig. 2 Distribution of radioactive intensity in major coalfields of Northeast China

I—极强(very strong); II—强(strong); III—中等强度(moderate); IV—弱(weak); V—无数据煤田(without data); 1—亮中—古榆树; 2—金长; 3—铁法; 4—彰武; 5—阜新; 6—八道壕; 7—三台子; 8—义县; 9—西丰; 10—大甸子; 11—抚顺; 12—沈北; 13—永乐; 14—北票; 15—和尚沟; 16—建昌—凌源; 17—南哨—杨树沟; 18—南票; 19—杨家杖子—虹螺岬; 20—马架子—暖河子; 21—草河掌; 22—田师傅; 23—凤城; 24—恒仁; 25—本溪; 26—红阳; 27—董家沟; 28—白城—万红; 29—瞻榆; 30—四平—双辽; 31—双城堡—刘房子; 32—营城—羊草沟; 33—榆树; 34—辽源; 35—双阳; 36—蛟河; 37—安图; 38—延吉; 39—和龙; 40—凉水; 41—珲春; 42—春化; 43—敬信; 44—三合; 45—屯田营—春阳; 46—伊通; 47—舒兰; 48—梅河—桦甸; 49—敦化; 50—边沿—后沈家; 51—三棵榆树—衫松岗; 52—新开岭—三道沟; 53—浑江; 54—烟筒沟—漫江; 55—长白; 56—漠河; 57—霍拉盆; 58—欧浦; 59—呼玛; 60—大西江; 61—龙江; 62—李三店; 63—颜家沟; 64—山泉; 65—西岗子; 66—四季屯; 67—红绣沟; 68—黑宝山—木耳气; 69—依龙; 70—建兴; 71—翠岭; 72—东兴; 73—木兰; 74—凤山; 75—方正断陷; 76—胜利断陷; 77—山河断陷; 78—嘉荫; 79—新河口; 80—延兴; 81—二九〇; 82—鹤岗; 83—汤原断陷; 84—绥滨—集贤; 85—七星河; 86—双鸭山; 87—双桦; 88—小城市—万金山; 89—小营盘; 90—迎门山; 91—勃利; 92—桦南; 93—青山; 94—四海店; 95—兴凯湖; 96—虎林; 97—鸡西; 98—鸡东; 99—林口; 100—五林; 101—东宁; 102—老黑山; 103—朝阳—大和镇; 104—南横林子; 105—扎赉诺尔; 106—巴彦山; 107—呼和诺尔; 108—得尔布; 109—开放山; 110—三角地; 111—西胡里吐; 112—特兰图; 113—五九; 114—莫拐—石瓦鲁; 115—大雁; 116—免渡河; 117—胡列也吐; 118—大杨树; 119—牯牛海; 120—黄花山; 121—联合屯; 122—温都花; 123—塔布花; 124—宝龙山; 125—双辽; 126—吉尔嘎朗; 127—绍根; 128—当铺地; 129—永丰; 130—元宝山; 131—平庄; 132—四龙; 133—亿合众; 134—沙力好来; 135—乌尼特; 136—拉布达林

将综合评价结果与单项指标评价对比发现,综合评价结果与单项评价排序存在差别:巴彦山煤田钻孔数、煤层异常孔、煤层放射性强度3项指标排名第一;呼和诺尔煤田煤上放射性强度、煤间异常孔2项指标排名第一;阜新煤田煤层异常孔、煤层放射性强度、煤间异常孔3项指标排名第三;而煤上异常孔数排名靠前的铁法煤田、异常率排名靠前的长胜煤田、煤间放射性强度排名靠前的西胡里吐煤田、煤下煤层异常孔和煤下放射性强度排名靠前的勃利煤田在综合评价结果中表现一般。分析认为导致排名下降的原因是钻孔数少,煤下放射性权重低,异常率偏低,综合评价结果较可靠。

总体上看,东北地区煤田的地质环境放射性以海拉尔断陷赋煤带最强,分布的煤田有巴彦山、呼和诺尔、西胡里吐、扎赉诺尔、开放山等,放射性等级为强和极强。放射性异常位置为白垩系的大磨拐河组,异常位于白垩系1~2号煤层的顶部或者顶板,异常深度35~70 m,异常之上普遍发育有一层厚为20~30 m的砂质砾岩、砂岩,异常厚度多小于1 m。根据异常特征分析,含铀含氧水在含水层径流与顶层煤、泥炭长期接触,使得铀被吸附和固定,造成顶层煤放射性较高。大兴安岭、小兴安岭、辽东吉南等赋煤带放射性普遍较弱。松辽西、松辽东、三江穆棱河、虎林兴凯湖等赋煤带放射性强弱分布不平衡,各等级均有分布。

具有较高放射性的煤田在开采过程中,根据异常层位不同,其开采及利用过程会对水源、土壤、大气造成不同程度的影响。对于煤层型异常,应根据异常强度确定可开采、限制开采、禁止开采不同级别的危险等级。对于煤上型、煤下型异常,应主要针对开采产生的矸石堆放及二次利用可能产生的危害进行预防,在开采过程中工人做好防护,避免吸入或者食入带异常的粉尘造成内辐射伤害,禁止对带有放射性异常的矸石及煤灰渣进行二次生产利用,矸石及煤灰渣堆放地需用无污染土壤覆盖隔离放射性。

3.2 异常孔和异常率分析

东北地区84个煤田中具有放射性异常的煤田为43个,总体煤田异常率为51%,其中存在煤上、煤层、煤间、煤下煤田分别为34、14、17、31个,说明研究区具有煤层异常的煤田比例较低,绝大多数煤层属于放射性安全范围,这与我国多数煤含有的放射性核素水平

并不太高结论是一致的^[18-19]。在筛查勘查钻孔 12915 孔中,具有放射性异常钻孔数为 1114,总体钻孔异常率为 8.63%,说明在一定比例的煤田中存在极少放射性异常测井。

分析测井曲线放射性异常来源,可能为成煤物质吸附次生放射性物质引起,也可能为断裂破碎带中氡(Rn)及其子体逸出形成,也可能是不同岩性的地层形成^[20]。不同来源造成的放射性异常在放射性测井的异常率上有较大差别。由断裂带引起的放射性异常孔少,异常率低;由煤层或煤层顶底板砂岩、泥岩等引起的异常成片出现,异常孔数多,异常率相对较高。绥滨-集贤、鸡西、珲春、鸡东、五九、小城子-万金山、西岗子、双鸭山、义县、双阳、彰武、拉布达林、四海店、和龙、北票等 15 个煤田异常孔少于 10 个,同时钻孔异常率小于 10%,推测有断裂带氡及其子体逸出引起伽玛

放射性增高的可能性。巴彦山、铁法、阜新、红阳、浑江、亮中-古榆树、营城-羊草沟、金长、平庄、凉水、绍根等 11 个煤田异常孔大于 10 个,同时钻孔异常率大于 10%,推测为含煤岩系沉积过程中吸附放射性核素,造成的含煤岩系高放射性。

3.3 含煤岩系异常强度及类型分析

岩层的放射性强度主要取决于岩石中放射性铀(U)、钍(Th)和钾(K)等元素的含量^[8]。东北地区沉积岩中的放射性核素多来自中生代岩浆岩基底,当岩浆岩被破坏时,放射性元素可以被运移或被分离。有的放射性元素(例如铀)能形成易溶于水的化合物,以溶液的形式被运移到物理化学环境适当的地方随其他物质一起沉积下来。由于沉积环境、岩类、物源及地球化学性质上的差别,地层中的放射性强度和范围上存在差异。对煤上、煤层、煤间、煤下 8 个指标进行相关分

表 5 不同层位放射性指标相关系数

Table 5 Correlation coefficients of radioactive indexes for different layers

	煤上异常孔数	煤上异常强度	煤层异常孔数	煤层异常强度	煤间异常孔数	煤间异常强度	煤下异常孔数	煤下异常强度
煤上异常孔数	1.00							
煤上异常强度	0.52	1.00						
煤层异常孔数	0.61	0.76	1.00					
煤层异常强度	0.07	0.43	0.42	1.00				
煤间异常孔数	0.50	0.63	0.79	0.04	1.00			
煤间异常强度	0.02	0.24	0.79	0.01	0.20	1.00		
煤下异常孔数	0.26	0.37	0.06	-0.26	0.00	-0.21	1.00	
煤下异常强度	0.22	0.40	0.07	-0.11	-0.12	-0.21	0.76	1.00

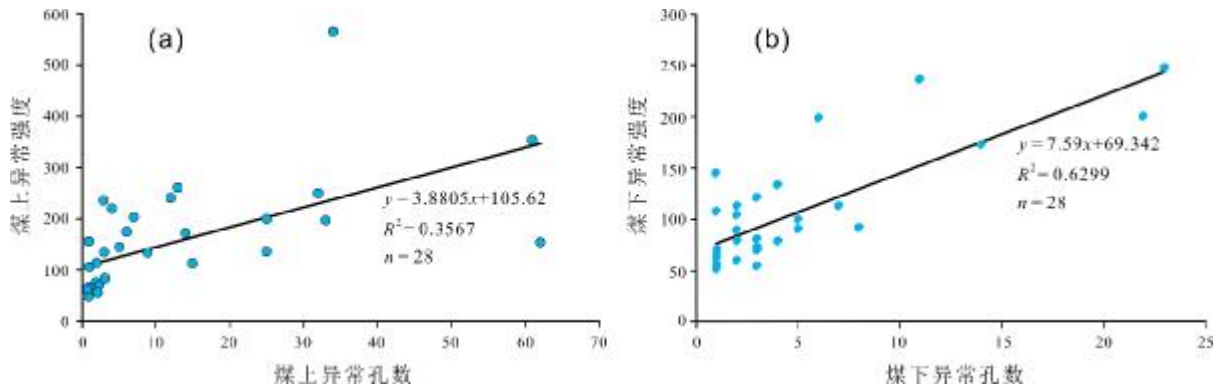


图 3 异常孔数与异常强度关系图

Fig. 3 Relation between anomaly hole numbers and anomaly intensity

a—煤上异常孔数与煤上异常强度(anomaly hole number vs. anomaly intensity of 0-20 m above coal seam roof); b—煤下异常孔数与煤下异常强度(anomaly hole number vs. anomaly intensity of 0-20 m below coal seam floor)

析后,发现煤上的异常孔数与煤上放射性强度之间,煤层异常孔数、煤层强度、煤间异常孔数和煤间强度四者之间,以及煤下异常孔数与煤下强度之间存在弱正相关(表5)。将煤上和煤下的异常强度和孔数做散点图(图3)可见,随着异常强度的变大,异常孔数也随着增多,究其原因放射性核素物源量增大所引起。

矿物质吸附次生放射性物质的能力与沉积时所处的环境及条件有关,在有机物较多的还原条件下,溶于水且易迁移的六价铀还原成难溶于水的四价铀,被有机质胶体吸附而聚积。在煤层的原始物质聚积过程中,始终伴随着沉积环境和条件的变化,从而也就相应地形成了一系列放射性强弱不同的分层。对东北地区含煤岩系放射性异常类型进行分析后发现,呼和诺尔、勃利、浑江、红阳、八道壕、阜新等6个煤田具有4种异常类型,9个煤田具有3个异常类型,17个煤田具有2个异常类型,11个煤田具有1个异常类型。煤上、煤下、煤层、煤间等不同放射性异常类型及其组合主要是由沉积环境变化造成的。

参考文献:

- [1]杨建业. 多能源同盆共存中铀的煤地球化学研究现状及思路[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 720-725.
- [2]Bellis D, Ma R, Bramall N, et al. Airborne uranium contamination—as revealed through elemental and isotopic analysis of tree bark[J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 383-387.
- [3]刘华, 罗建军, 马成辉. 第一次全国污染源普查伴生放射性污染源普查及结果初步分析[J]. 辐射防护, 2011, 31(6): 334-341.
- [4]刘强, 金洪涛, 朱巍, 等. 辽宁省主要煤田含煤岩系放射性特征分析[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 263-267.
- [5]刘强, 朱巍, 田辉, 等. 燃烧试验在煤的放射性环境影响评价方法研究中的应用[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 389-393, 382.
- [6]王玥. 近代辽宁地区的煤炭勘探与生产[J]. 兰台世界, 2016(5): 121-122.
- [7]郭秋菊. 核科学百年讲座第九讲电离辐射与人类生活及环境[J]. 物理, 2003, 32(9): 618-621.
- [8]张晗, 闫大海, 刘鹏飞. 核能放射性污染研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(10): 78-81.
- [9]李怡, 侯向阳, 武自念, 等. 羊草种质资源抗旱性综合评价[J]. 中国草地学报, 2019, 41(1): 75-82.
- [10]郑琦, 王海江, 吕新, 等. 新疆棉田土壤质量综合评价方法[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1291-1301.
- [11]张发明, 华文举, 李玉茹. 几种综合评价方法的稳定性分析[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(4): 595-610.
- [12]彭曙光, 潘和平, 王霁霞, 等. 自然伽马能谱井在储层评价中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(4): 480-484.
- [13]佟英梅. 利用自然伽马测井曲线研究煤层结构及其沉积环境[J]. 测井技术, 1983(4): 49-55.
- [14]谷现平, 聂新恕, 张树胜. 自然伽马异常在宣东矿区岩煤层对比中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(S1): 94-96, 110.
- [15]刘丽萍, 赵世民, 张宇, 等. 滇池水环境质量综合评价方法[J]. 中国环境监测, 2019, 35(4): 100-108.
- [16]熊婷, 王湛, 田勇, 等. 终端区运行效能综合评价方法[J]. 科技管理研究, 2019, 12: 64-70.
- [17]许世存, 易平涛, 郭亚军, 等. 基于数值分布的激励型综合评价方法[J]. 运筹与管理, 2019, 28(9): 117-121, 166.
- [18]姜希文, 刘秋生, 李瑞香, 等. 我国煤中天然放射性核素水平[J]. 辐射防护, 1989, 9(3): 181-188.
- [19]黄文辉, 唐修义. 中国煤中的铀、钍和放射性核素[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(S1): 55-63.
- [20]何星, 孙宇东. 柴达木盆地煤田测井中放射性异常对找放射性矿床的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(4): 549-555.