

基于4G-RTU的水体 γ 放射性在线 监测系统研制

张胜^{1,2,3} 王永军^{1,2,3} 王瑞军^{1,2,3} 黄清波^{1,2,3} 张春雷^{1,2,3} 武明洋^{1,2,3}

1(核工业航测遥感中心 石家庄 050002)

2(国家核应急航空监测技术支持中心 石家庄 050002)

3(中核核应急航空监测工程技术研究中心 石家庄 050002)

摘要 针对当前海洋、湖泊、水库、河流等水体放射性在线监测和应急监测的实际需要,研制了一套水体 γ 放射性在线监测系统。监测系统由基于NaI探测器的 γ 射线监测装置、4G远程终端(4G Remote Terminal Unit, 4G-RTU)通信单元、供电一体化防水抗压浮体装置以及配套软件组成。利用监测系统开展了 γ 射线监测装置的主要性能指标、系统的适应性和准确性以及软件功能等测试,采集了足量的原始能谱数据,进行了设计指标与实测指标的对比分析,并开展了初步应用研究。结果表明:在4G网络覆盖的范围内,该系统能够实现全天时远程操控设备,完成实时在线监测并上传数据,满足应用需求,达到预期功能。系统的可探测能量范围为30~3 000 keV,对¹³⁷Cs的662 keV γ 射线的能量分辨率为7.3%;对²⁰⁸Tl的2 614 keV γ 射线的能谱漂移为0.33%,能谱能量线性度为0.999 970;系统在连续工作7 h条件下,能谱稳定性最大值为2.28%,最小值为-2.36%,对¹³⁷Cs的最小可探测活度(Minimum Detectable Activity, MDA)为0.75 Bq·L⁻¹;系统的工作温度范围为-5~+50 °C。该系统可用于海洋、湖泊、河流等水体的放射性在线监测和应急监测领域,具有重要的推广价值和应用前景。

关键词 4G-RTU, 水体, γ 放射性, 在线监测

中图分类号 TL75⁺1, TL816⁺.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010402

Development of an online monitoring system for water body γ radioactivity based on 4G-RTU

ZHANG Sheng^{1,2,3} WANG Yongjun^{1,2,3} WANG Ruijun^{1,2,3} HUANG Qingbo^{1,2,3}

ZHANG Chunlei^{1,2,3} WU Mingyang^{1,2,3}

1(Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China)

2(China National Airborne Monitoring Technical Support Center for Nuclear Emergency, Shijiazhuang 050002, China)

3(China Nuclear Emergency Aviation Monitoring Engineering Technology Research Center, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract [Background] With the rapid development of nuclear energy and the wide application of nuclear technology, the radioactivity level of bodies of water has become a highly concerning issue for the public and governments, especially after the Fukushima nuclear accident in Japan. [Purpose] This study aims to develop an online γ radioactivity monitoring system based on 4G Remote Terminal Unit (4G-RTU) to meet the needs of online and emergency monitoring of water radioactivity. [Methods] First, the γ -ray monitoring device based on sodium

核工业航测遥感中心自主科研项目(No.2019-01)资助

第一作者: 张胜, 男, 1973年出生, 1998年毕业于河北大学, 应用数学专业, 高级工程师, 研究领域为核应急航空监测技术及数据处理方法, E-mail: zhangsheng1097@163.com

收稿日期: 2023-06-06, 修回日期: 2023-07-24

Supported by Independent Research Project of Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry (No.2019-01)

First author: ZHANG Sheng, male, born in 1973, graduated from Hebei University in 1998, major in applied mathematics, senior engineer, focusing on airborne monitoring technology and data processing method for nuclear emergency, E-mail: zhangsheng1097@163.com

Received date: 2023-06-06, revised date: 2023-07-24

iodide detector, 4G-RTU, an integrated power supply waterproof and compression resistant floating device and corresponding software were employed to compose an online monitoring. Second, Qt programming control software was used to realize the remote control of the system, real-time radioactivity monitoring, and data upload. Finally, the original data obtained by the system were used to test the performance indicators, applicability, accuracy, and software functions to verify the practicability of the system. **[Results]** Within the coverage of the 4G network, the system realizes remote control of equipment, real-time online monitoring, and data upload throughout the day. The detectable energy range of the system is 30~3 000 keV, and the energy resolution of the system for ^{137}Cs at 662 keV is 7.3% with minimum detectable activity of $0.75 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$. The spectral drift for ^{208}Tl at 2 614 keV is 0.33%, and the linearity of the spectral energy is 0.999 970. The maximum value of energy spectrum stability is 2.28% for 7 h continuous operating, and the minimum value is -2.36%. The operating temperature range of the system is in the range of $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ to $+50 \text{ }^\circ\text{C}$. **[Conclusions]** The on-line monitoring system meets the application demand and achieves the expected function. It has important popularization value and application prospects in the field of online radioactive monitoring of bodies of water such as oceans, lakes, and rivers.

Key words 4G-RTU, Water body, γ radioactivity, Online monitoring

随着核能技术的开发利用^[1-2],水体是否受到放射性污染一直是社会公众关心和政府高度关注的问题^[3],尤其是日本福岛核事故后,更是成为了关注焦点^[4-6]。针对当前水体放射性的日常监测监管及应急快速监测的实际需求,开展水体放射性在线监测系统研制对有效避免或防止水体放射性污染对人类健康及生态系统造成威胁和危害具有重要的现实意义。相比于传统的“现场采样-实验室分析”方法,将探测器直接浸入水体中进行实时在线监测,其快捷性和时效性无可替代^[7-8]。目前,国内外一些研究机构和组织先后研制出走航式^[9]、浮标定点式^[10-12]、拖曳式^[13]等类型的 γ 谱测量系统,尤其是福岛核事故后对海水放射性开展了系列监测技术研究^[8,14-15]和在线监测装置研制及校准方法研究^[16-17],但主要是针对特定水体进行短期测量,却存在着制作和维护成本高、结构和操作复杂、通信费用高、在线时间短,不能长时间连续监测等不足。针对以上问题,本文从水体放射性在线监测系统结构设计入手,利用物联网技术、4G通信技术与探测器技术,将探测装置、太阳能供电系统、通信模块及浮体进行了一体化设计与集成,研制了一套基于4G-RTU的低功耗、可远程操控的适用于长时间在线的水体放射性监测系统,并对系统的主要性能指标、可靠性和适用性进行了测试。

1 系统设计

1.1 总体架构

水体 γ 放射性在线监测系统由 γ 射线监测装置子系统和远程在线监测软件子系统两部分组成,其中 γ 射线监测装置子系统主要由探测器单元、4G-

RTU通信单元、供电一体化浮体单元等组成,主要功能是通过4G-RTU接收采集指令和实时发送采集的数据。远程在线监测软件子系统主要由数据库服务器、客户端及配套软件等组成,主要功能是通过配套软件实现与 γ 射线监测装置子系统的通信连接、设备参数的远程配置和控制、采集指令发送的交互,以及实时数据的接收、保存、处理、显示、阈值报警和历史信息查询统计等。系统总体架构如图1所示。

1.2 γ 射线监测装置子系统

1.2.1 探测器单元

探测器单元主要由闪烁探测器晶体、光电倍增管、多道分析器、高压模块、数据接口、防水抗压外壳等组成,采用了一体化集成设计,如图2(a)所示,主要负责水体放射性数据的实时采集。闪烁探测器晶体采用是NaI(Tl)晶体,尺寸大小为 $\phi 76.2 \text{ mm} \times 76.2 \text{ mm}$,探测能量范围为30~3 000 keV,对 ^{137}Cs 的662 keV γ 射线的能量分辨率 $\leq 7.5\%$ 。多道分析器采用了自主研发的能够输出4 096道原始 γ 能谱数据的分析器。为保证更远的数据传输距离,数据接口采用了RS485接口。为防止外壳受水压而变形渗水从而造成NaI(Tl)晶体可能发生潮解和电路短路,防水抗压外壳采用了防护等级为IP68的不锈钢材料,内部填充了防潮泡沫,加装了防水密封件和电缆插头。经在压力测试井中进行防水抗压测试,升压至0.8 MPa,保持压力10 h,外壳无渗水无变形。探测器的电源线和数据信号线通过防水电缆接口分别连接至供电一体化浮体单元和4G-RTU设备。探测器实物如图2(b)所示。

1.2.2 4G-RTU通信单元

4G-RTU通信单元采用了一款工业级无线远程

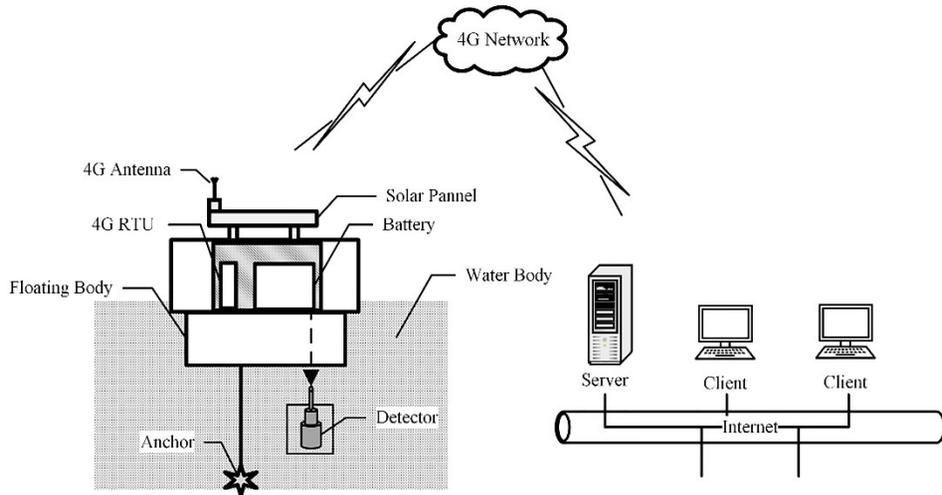
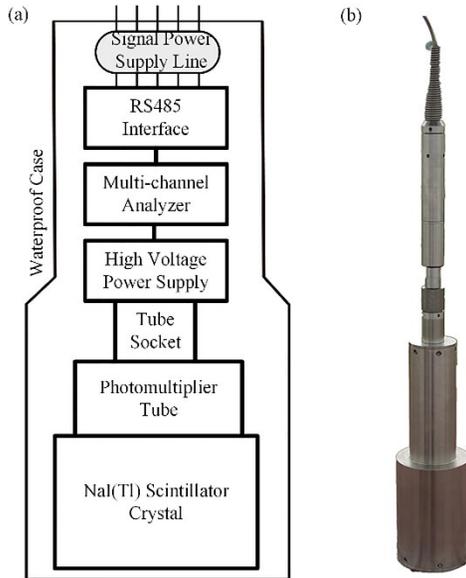
图1 水体 γ 放射性在线监测系统架构图Fig.1 Architecture schematic of online monitoring system for γ radioactivity in a body of water

图2 探测器单元的示意图(a)和实物图(b)

Fig.2 Schematic diagram (a) and photograph (b) of the detector unit

终端设备,设备内部封装集成了TCP/IP等多种网络通信协议,提供串口数据双向通信,支持“透明传输”

(连续传输数据)、自动心跳包、远程配置及控制等功能,无需单独上位机的支撑,只需接入4G运营商的公共网络经过简单配置后,即可建立探测器单元与远程在线监测软件子系统之间的通信,就可以进行设备调试、配置参数及监测数据的实时传输。4G-RTU通信单元与探测器单元的组网方式和指令流如图3所示。

1.2.3 供电一体化浮体单元

供电一体化浮体单元主要由浮体、太阳能供电系统、设备仪器舱及其他配件(锚、把手、警示灯等)等组成,采用了一体化集成设计,如图4(a)所示,主要用来作为 γ 射线监测装置子系统的支撑平台。浮体采用聚乙烯(Polyethylene, PE)为材质的圆柱体设计,内部填充泡沫(Expanded Polystyrene, EPS),浮体上面两侧的圆孔用于安装探测器和配重,中间大圆是带有电缆水密孔的密封舱盖,中间长方体为设备仪器舱,用来放置太阳能供电配套设备、蓄电池及4G-RUT等设备,浮体上面倾斜部分用于安装太阳能光伏阵列电池板。浮体单元的实物图如图4(b)所示。

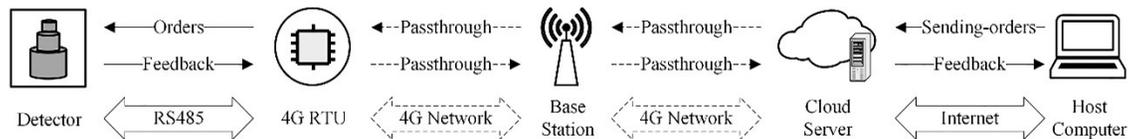


图3 4G-RTU通信单元的组网方式及指令流示意图

Fig.3 Schematic diagram of the networking mode and order flow of the 4G-RTU communication unit

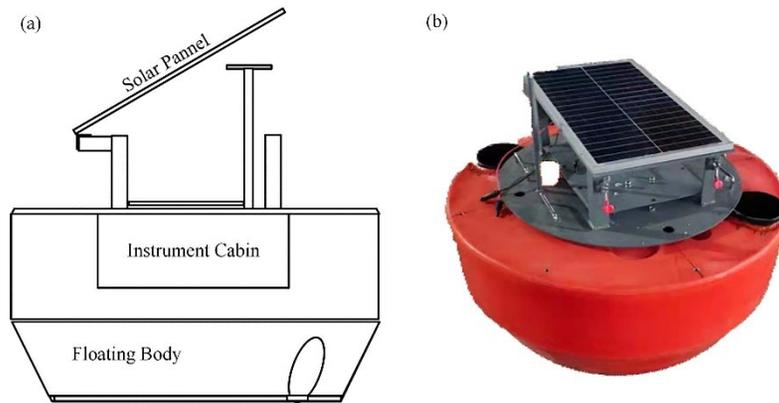


图4 浮体单元的示意图(a)和实物图(b)
Fig.4 Schematic diagram (a) and photograph (b) of the floating body unit

1.3 远程在线监测软件子系统

1.3.1 软件设计

软件系统采用了模块化设计,主要包括数据采集与控制模块、参数配置模块、网络传输模块、数据保存模块、数据图形显示模块、历史数据查询模块、超阈值报警模块、 γ 谱分析模块,如图5所示。

1)数据采集与控制模块:利用4G-RTU的“透传”功能进行无线通信连接,在本地实现参数设置、远程控制 γ 射线监测装置的运行和结束以及指令的发送。

2)数据传输模块:建立无线通信连接后,在本地

通过发送开始测量指令,实时读写虚拟串口数据,并进行数据的解译、格式转换及数据纠错,直到发送停止测量指令后,测量结束。

3)数据自动保存模块:主要实现将实时接收的数据,自动保存在本地数据库中。

4)数据显示模块:通过动态图表的方式,对实时测量结果数据,如谱数据、窗数据进行动态展示。

5)历史数据查询模块:通过设置查询条件,对数据库中的历史数据进行统计和分析。

6)超阈值报警模块:通过统计能谱总道数据的异常变化进行报警提示,阈值可以自定义设置。

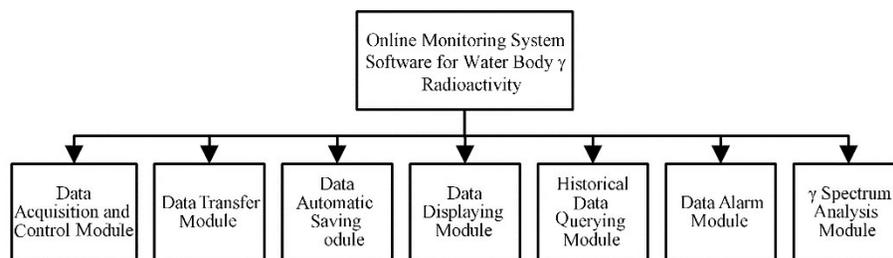


图5 系统软件设计架构
Fig.5 System software design framework

1.3.2 软件实现

软件以C++为开发语言,采用跨平台的Qt可视化编程框架,MySQL为底层数据库进行了自主开发,该软件具有支持多站点、断线自动连接,实时动态显示256/512/1024道 γ 能谱全谱数据以及设定的窗数据、测量时间、活时间、实时间等功能,实现了 γ 射线装置的远程参数设置和控制。软件实现的方法流程图如图6(a)所示,实际运行的主界面如图6(b)所示。

2 系统测试

2.1 主要性能指标测试

为表征 γ 射线监测装置的主要性能指标,利用水体 γ 放射性在线监测系统开展了主要指标测试。测试场地选定在室内固定区域,并将探测器置于空旷地面上。测试内容包括系统的能量分辨率、能谱峰漂、能量线性度和稳定性测试。

2.1.1 能量分辨率测试

测试方法:采用 ^{137}Cs 源进行探测器的能量分辨率测试。系统启动预热稳定30 min后,将 ^{137}Cs 测试

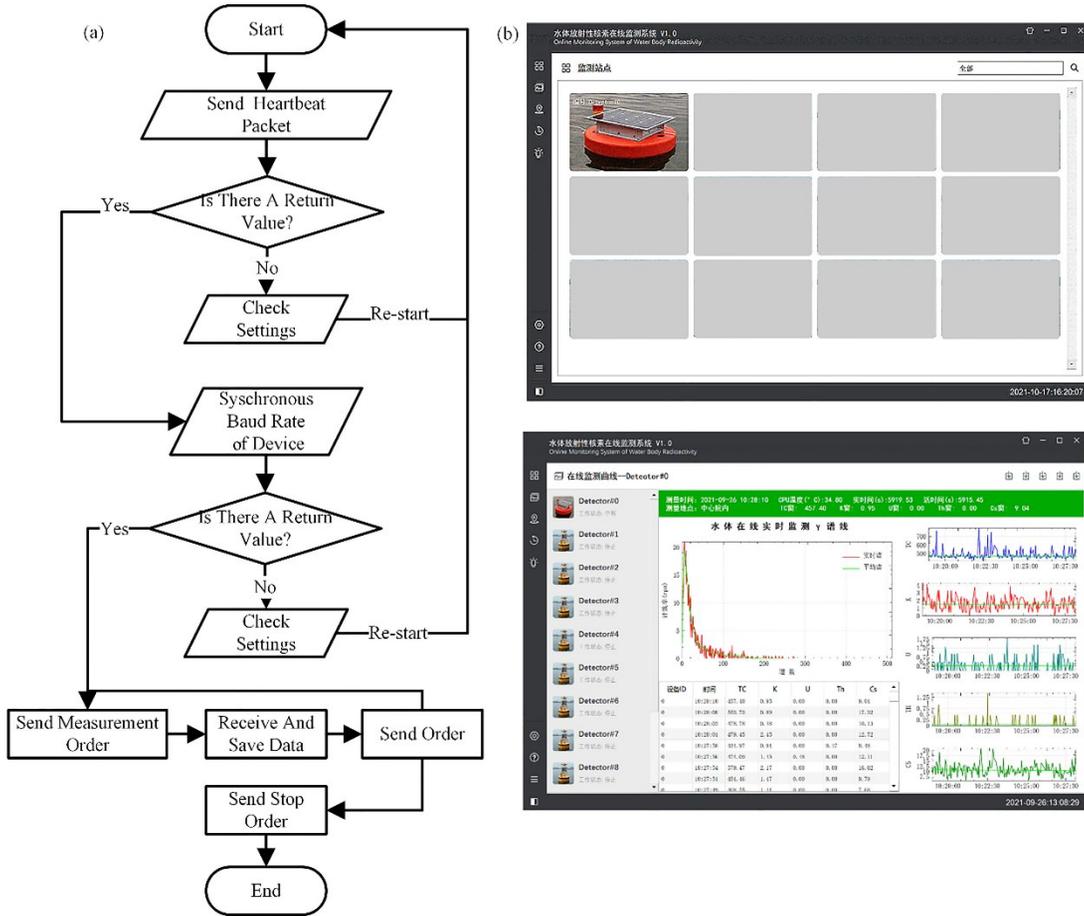


图6 软件实现方法流程图(a)和实际运行界面(b)
 Fig.6 Flowchart of software implementation method (a) and actual operating interface (b)

源放于探测器探头 10 cm 处,连续测量 10 min,记录一组 256 道能谱数据。然后将 ^{137}Cs 测试源移开,系统继续运行 7 h 后,再次将 ^{137}Cs 测试源置于原处,重复测量 10 min,记录一组 256 道能谱数据。对两组数据的 662 keV γ 射线特征峰的能量分辨率分别进行计算,要求结果均小于 7.5%。图 7 为使用相同 ^{137}Cs 测试源两次测得的谱线,表 1 为测试结果。

从图 7 可以看出,662 keV γ 射线特征峰几乎重合。从表 1 计算得到的能量分辨率计算结果来看,系统运行 7 h 后,能量分辨率相对变化率为 0.493 5%,两次结果均小于设计指标 7.5%。

2.1.2 能谱峰漂测试

测试方法:采用与能量分辨率测试相同的方法,将 ^{232}Th 测试源放于探测器探头 10 cm 处,进行两次

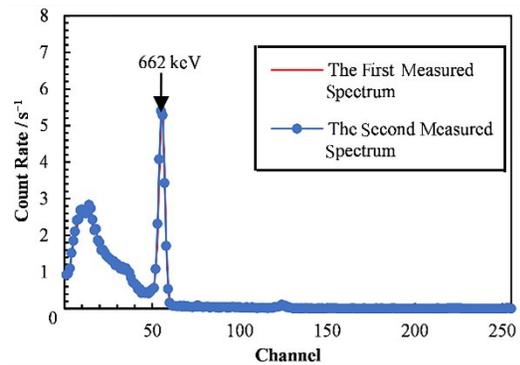


图7 能量分辨率 ^{137}Cs 测试的两次实测谱线
 Fig.7 Two measured spectra of the ^{137}Cs energy resolution

重复测量,测试时间 10 min,间隔时间 7 h,记录两组 256 道能谱数据。对两组数据的 662 keV γ 射线特征峰进行峰位计算,并与预设峰位进行比较,按照科

表 1 能量分辨率测试结果
 Table 1 Energy resolution test results

序号 No.	核素 Nuclide	γ 特征峰 γ Characteristic peak / keV	峰位道址 Peak channel	半峰宽 Half peak width	能量分辨率 Energy resolution / %	测量时间 Measuring time / min
1	^{137}Cs	662	54.573	3.98	7.296 85	10
2	^{137}Cs	662	54.565	3.96	7.260 84	10

研任务书的技术指标要求,对 ^{208}Tl 的2 614 keV γ 射线的能谱峰漂的相对偏差均小于1%。图8为使用相同 ^{232}Th 测试源两次测得的谱线,表2为测试结果。从两次测试结果可知,能谱峰漂的相对偏差均小于1%。

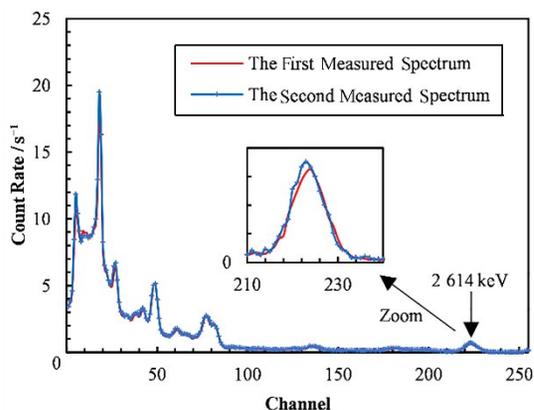


图8 能量峰漂测试的两次实测谱线
Fig.8 Two measured spectra of the energy spectrum peak drift test

2.1.3 能量线性度测试

测试方法:系统启动预热稳定30 min后,将 ^{137}Cs 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{214}Bi 、 ^{60}Co 测试源分别放于探测器探头10 cm处进行测量,测量时间10 min,记录存储256道能谱数据;移除测试源后,进行本底测量1 h。读取能谱数据分别计算 ^{137}Cs 、 ^{208}Tl 、 ^{40}K 、 ^{214}Bi 和 ^{60}Co 的中心峰位道址,最后将核素能量与道址进行线性拟合,要求能谱线性度 R^2 优于0.999。拟合曲线如图9所示,可知能谱线性度 R^2 为0.999 970,优于0.999的指标要求。由此确定的系统的 γ 能窗设置如表3所示,文中的窗参数均采用此设置。

2.1.4 系统稳定性测试

测试方法:系统启动预热稳定30 min后,在室内固定位置连续工作7 h,每小时记录一组数据,每组数据的测量时间为60 min。对获取的7组测量数据计算其总计数率窗(TC)、钾窗(K)、铀窗(U)、钍窗(Th)的计数率、最大值、最小值以及除去最大值、最小值所在数据组的其余5组数据的平均值。根据式

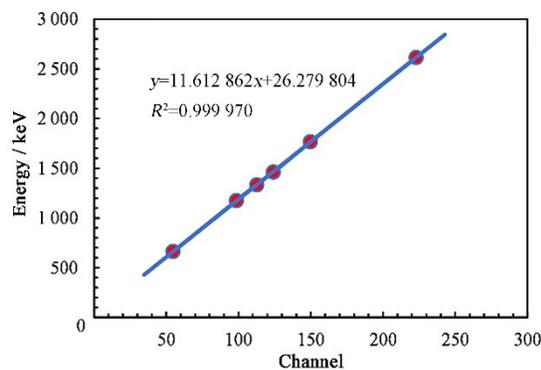


图9 能量线性度测试的拟合直线及公式
Fig.9 Liner fitting line and equation of the energy linearity test

(1)计算出系统的稳定性的变化情况,按照科研任务书的技术指标要求,系统稳定性优于 $\pm 5\%$ 。

$$\delta = \frac{N_{(\max, \min)} - \bar{N}_j}{\bar{N}_j} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ 表示系统的稳定性; \bar{N} 表示除去最大值、最小值所在组数据外,其他组数据的平均值;下标 j 表示数据组的索引; $N_{(\max, \min)}$ 表示窗数据的最大值(最小值)。

测试结果如表4所示。由表4可知,能谱稳定性的最大值为+2.28%,最小值为-2.36%,优于系统稳定性 $\pm 5\%$ 的设计指标。

2.2 地面测量标准模型测试

为了验证水体 γ 放射性在线监测系统监测结果的正确性,在石家庄核工业航测遥感中心的地面测量模型标准装置YB2、YK2、YU1、YTH1、YM2上分别进行了测试。经YM2标准模型含量(2021年)计算验证,模型标称值与测量值的相对偏差分别为K:0.84%,U:6.68%,Th:2.69%,满足轻便窗式 γ 能谱仪检定规程(JJG(军工)40-2014)中相对偏差的要求: $|E_k| \leq 12\%$ 、 $|E_u| \leq 7\%$ 和 $|E_{th}| \leq 7\%$ 。图10(a)为YM2模型测试时的照片,图10(b)为获取的实测谱线。

表2 能谱峰漂测试结果
Table 2 Energy spectrum peak drift test results

序号 No.	核素 Nuclide	γ 特征峰 γ Characteristic peak / keV	峰位道址 Peak channel	预设峰位道址 Preset peak channel	相对偏差 Relative deviation / %	测量时间 Measuring time / min
1	^{208}Tl	2 614	222.750	222.947	0.09	10
2	^{208}Tl	2 614	222.219	222.947	0.33	10

2.3 系统适应性测试

为了验证研制的水体 γ 放射性在线监测系统的适用性,分别进行了系统的防水性测试、功耗测试、

4G网络的无线数据传输测试及工作温度测试。经过实际测试, γ 射线监测装置子系统防水性能良好,总体功耗为1.896 W,太阳能供电结合蓄电池可以保

表3 系统 γ 能窗设置
Table 3 γ energy window settings of the system

窗 Window	核素 Nuclide	道址范围 Channel range	能量范围 Energy range / keV
总窗(TC)	—	1~240	36~2 810
钾窗(K)	^{40}K (1 460 keV)	116~133	1 370~1 570
铀窗(U)	^{214}Bi (1 765 keV)	141~150	1 660~1 860
钍窗(Th)	^{208}Tl (2 614 keV)	205~240	2 410~2 810
铯窗(Cs)	^{137}Cs (662 keV)	50~60	602~722

表4 系统稳定性测试结果
Table 4 System stability test results

时间 Time / h	计数率 Count rate / s^{-1}			
	TC	K	U	Th
1	663.00	14.53	3.19	2.65
2	664.77	14.64	3.26	2.71
3	667.62	14.51	3.31	2.65
4	665.93	14.56	3.30	2.69
5	657.82	14.37	3.22	2.62
6	653.56	14.16	3.25	2.66
7	651.12	14.11	3.17	2.59
N_{\max}	667.62	14.64	3.31	2.71
N_{\min}	651.12	14.11	3.17	2.59
\bar{N}_j	661.02	14.43	3.24	2.65
$\delta_{\max} / \%$	1.00	1.52	2.00	2.28
$\delta_{\min} / \%$	-1.50	-2.19	-2.36	-2.32

注: N_{\max} 和 N_{\min} 分别表示数据组的最大值和最小值, $\delta_{\max}(\%)$ 和 $\delta_{\min}(\%)$ 分别表示取窗数据最大值和最小值时的稳定性

Notes: N_{\max} and N_{\min} represent the maximum and minimum values of the dataset, $\delta_{\max}(\%)$ and $\delta_{\min}(\%)$ represent the stability when taking the maximum and minimum values of the window data

证系统可长时间连续在线监测,在4G网络覆盖和互联网接入正常的情况下,数据传输正常,在网络信号中断后能够自动连接,继续测量。系统工作温度采

用了第三方(河北省计量监测研究院)测试,测试方法为:首先将探测器置于测试容器中启动系统,运行正常后,按照每小时温度均匀上升/下降 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的间隔,从室温+ $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,均匀下降到 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,后均匀上升至+ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,再均匀下降至室温+ $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,共测试22 h,观察温度变化引起的能谱数据变化情况,要求系统运行且获取能谱数据正常。测试结果表明,在 $-5\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内系统运行正常,获取能谱数据正常,其中在+ $33\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,TC窗计数率总体变化不明显,而K窗、Th窗计数率变化明显,说明谱仪自动稳谱程序在此温度范围内需进一步改进和修正。图11(a)为系统工作温度测试照片,图11(b)为随时间温度变化的实测窗数据曲线。

2.4 系统探测核素 ^{137}Cs 最小可探测活度浓度的计算

在对水体放射性进行测量时,由于水体的放射性浓度水平较低,测量的净计数与本底计数率不相上下,有时候甚至还要低,因此,最小可探测活度(Minimum Detectable Activity, MDA)是探测系统非常重要的性能参数之一。在置信概率为95%的情况下,探测系统的MDA可由式(2)计算得到:

$$\text{MDA} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{N}}{t \times \varepsilon \times P} \quad (2)$$

式中: N 为本底计数, $N=B \times t$, B 为放射性核素的背景计数率; t 为系统的探测时间; ε 为系统探测效率; P 为射线发射概率。

式(2)中, ^{137}Cs 探测效率 ε 是关键参数。鉴于实验条件的限制,为了研究 γ 能谱仪的探测下限,提出利用已知活度的 ^{137}Cs 标准体源,通过地面实验测量模拟 ^{137}Cs 标准溶液的方法来获取核素 ^{137}Cs 的探测效率,进而利用式(2)计算 ^{137}Cs 的MDA。具体方法

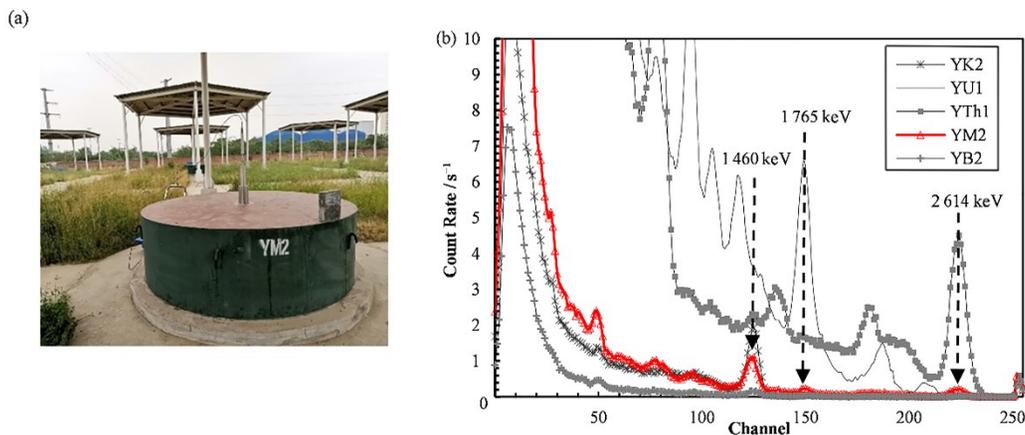


图10 YM2模型测试照片(a)和实测谱线(b)
Fig.10 YM2 model test photograph (a) and measured spectrum (b)

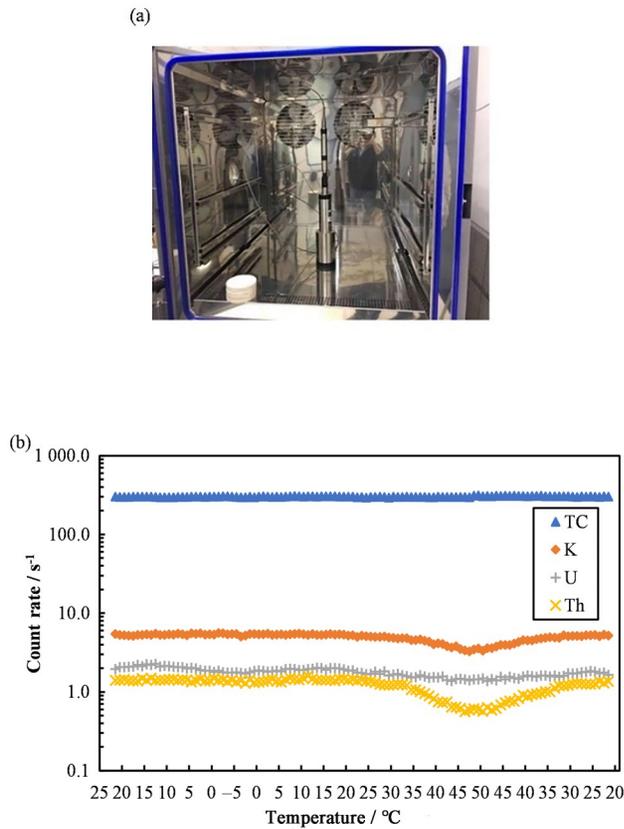


图11 系统工作温度测试照片(a)和实测窗数据曲线(b)
Fig.11 System working temperature test photograph (a) and measured window data curves (b)

步骤如下：

1)测试条件准备。选用密度与水的密度相当、低活度的 ^{137}Cs 标准体源1枚,编号为041213,生产日期为2013年4月12日,活度为309 Bq,净重为341.4 g,体源直径 $d_{Cs}=7.5$ cm,高 $h_{Cs}=7$ cm;低本底铅屏蔽室1个;研制的探测器系统1套,探头直径 $d_{probe}=$

7.5 cm,高 $h_{probe}=7.5$ cm。

2)环境本底测量。将探测器置于铅屏蔽室底部中心,系统预热稳定30 min后,关闭铅屏蔽室上盖,开始进行本底测量,采样时间设置为2.1 s,系统连续工作15 h,实时记录存储256道能谱数据,共获取到25 677组本底谱数据。

3) ^{137}Cs 标准体源测量。将 ^{137}Cs 标准体源置于铅屏蔽室内底部中心,探测器放置于体源顶部中心上方1 cm,关闭铅屏蔽室上盖,开始进行 ^{137}Cs 标准体源测量,采样时间设置为2.1 s,系统连续工作7.72 h,实时记录存储256道能谱数据,共获取到13 237组 ^{137}Cs 标准体源谱数据。

4)计算 ^{137}Cs 窗的净计数率,求取 ^{137}Cs 的探测效率 ϵ 。通过对获取的谱数据进行解译和处理,窗道址范围设置为50~60,求得 ^{137}Cs 窗的净计数率 $N_{net}=0.901 \cdot s^{-1}$ 。通过计算 ^{137}Cs 源活度 $A=257.038$ Bq,体积 $V_{Cs}=309.250$ cm^3 ,测量时间 $t=27$ 798 s。以放射源顶部中心为球心,放射源的高 $h_{Cs}=7$ cm为半径的球体体积 $V_{sphere}\approx 1$ 436.8 cm^3 。通过将与水密度相当的放射体源模拟为活度为309 Bq的 ^{137}Cs 标准溶液,源放置于探头底部1 cm处,则相当于距离水面1 cm。由于探头上部被遮挡且与源的距离只有1 cm,假定角响应影响忽略不计,则探头接收到光子的有效体积 $V_{probe}=44.178$ cm^3 ,因此 ^{137}Cs 的探测效率 $\epsilon=N_{net}/(A \times P \times V_{probe}/V_{sphere})\approx 13.41\%$ 。

5)利用式(2)计算得到 ^{137}Cs 的MDA。经计算可知, ^{137}Cs 的MDA为0.753 781 Bq \cdot L $^{-1}$ (测量时间:7.72 h),满足设计指标1 Bq \cdot L $^{-1}$ 的要求。测试用装置如图12(a)所示,测得的 ^{137}Cs 去除本底后的谱线如图12(b)所示。

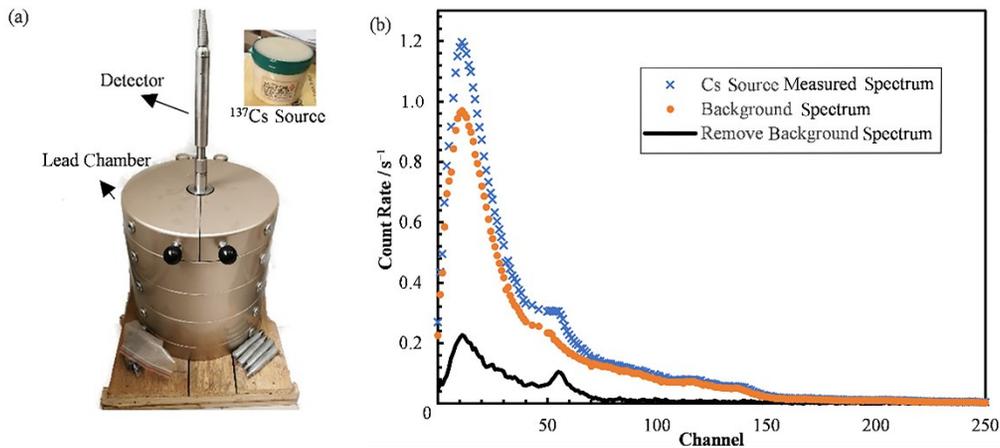


图12 ^{137}Cs 体源及铅室照片(a)和 ^{137}Cs 去除本底后的谱线(b)
Fig.12 Photograph of ^{137}Cs volume source and lead chamber (a) and spectrum with removed background (b)

3 系统初步应用

为了验证研制的水体 γ 放射性在线监测系统的实用性和可靠性,在石家庄太平河开展了初步实地测试。测试地点的河水水量充沛,水流缓慢,水面散有部分藻类,水深保持在2.0~2.5 m。将研制的供电一体化浮标装置和 γ 射线监测装置子系统置于水下深度1.5 m,采样时间设置为2.1 s,利用自主研发的在线监测软件远程启动系统,通过4G网络将采集的数据无线实时传输至位于数据中心。系统连续运行时长21.45 h,采集有效数据36 798组,其中系统功能测试数据5 598组,实际连续测量数据为31 200组。针对31 200组能谱数据的TC、K、U和Th窗数据,按照累积采样时间300 s,记录计数率的变化情况并进行了统计分析,从数据结果发现,测试点水域的总体计数率非常低,而K、U、Th计数率的变化相对稳定,未发现其他数据异常,说明测试点水域的放射性处于正常水平。

为了进一步验证供电的可靠性,在石家庄滹沱河进行了连续3个多月的实际应用。结果表明,研制的系统能够实现水体中 γ 放射性的长期连续性测量,且在网络覆盖的范围内随时可以浏览监测数据。图13为太平河监测点实测现场照片,图14为TC、K、U和Th窗计数率300 s的变化曲线。



图13 石家庄太平河实测现场照片

Fig.13 Actual on-site photograph of the measured field in the Taiping river of Shijiazhuang city

4 结语

针对水体 γ 放射性长时在线监测和应急监测的实际需求,研制了一套基于4G-RTU的水体 γ 放射性在线监测系统,开展了系统的 γ 射线监测装置的主要性能指标、适应性、准确性、实用性测试以及远程控制软件系统的功能测试。测试结果表明:该系统满足任务需求,实现了4G网络覆盖的范围内设备的远程操控设备,数据的实时采集、处理、显示、保存和统计等功能。实际应用和效果表明,该系统在4G网

络覆盖的范围内,可不受地域和时间限制随时监控和浏览水体的放射性状况,且具有自主可控、建设和维护成本低等特点,可以为水体放射性日常和应急监测研究与实践提供可靠、低成本的数据来源,在水体放射性在线监测领域具有重要的推广价值和应用前景。

致谢 感谢李怀渊总工、徐国苍研究员级高工、张积运研究员级高工、刘士凯研究员级高工、倪卫冲研究员级高工、胡明考研究员级高工、江民忠研究员级高工、房江奇研究员级高工以及杨金政高工、陈元庆高工提供的帮助和指导,感谢同事刘林峰、安政伟、刘学、牛国臣、王浩然、宋振涛、曾玉洁、孙禄健、郝明鑫等提供的帮助。

作者贡献声明 张胜负责论文撰写、方法设计、数据分析、软件开发;王永军负责论文审核、项目管理、方法指导、测试协调;王瑞军负责论文审核、资源、监管、测试;黄清波负责硬件研制、数据分析;张春雷负责设备采购、安装和调试;武明洋负责论文整理。

参考文献

- 叶奇蓁, 苏罡, 黄文, 等. 中国核能现代化发展战略[J]. 科技导报, 2022, 40(24): 20 - 30. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.24.003.
YE Qizhen, SU Gang, HUANG Wen, *et al.* Research on development strategy of China nuclear energy modernization[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(24): 20 - 30. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.24.003.
- 刘蕴韬, 安世忠, 梁积新. 核技术应用现状及发展趋势[J]. 科技导报, 2022, 40(11): 88 - 97.
LIU Yuntao, AN Shizhong, LIANG Jixin. Current status and prospect of nuclear technology and application[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(11): 88 - 97.
- 徐园, 孔海宇, 王希涛, 等. 水体环境中的放射性污染及测量[J]. 核安全, 2020, 19(1): 75 - 79. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.01.009.
XU Yuan, KONG Haiyu, WANG Xitao, *et al.* Radioactive pollution in water environment and its measurement[J]. Nuclear Safety, 2020, 19(1): 75 - 79. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.01.009.
- Buesseler K, Aoyama M, Fukasawa M. Impacts of the fukushima nuclear power plants on marine radioactivity [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(23): 9931 - 9935. DOI: 10.1021/es202816c.
- Nakano M, Povinec P P. Long-term simulations of the

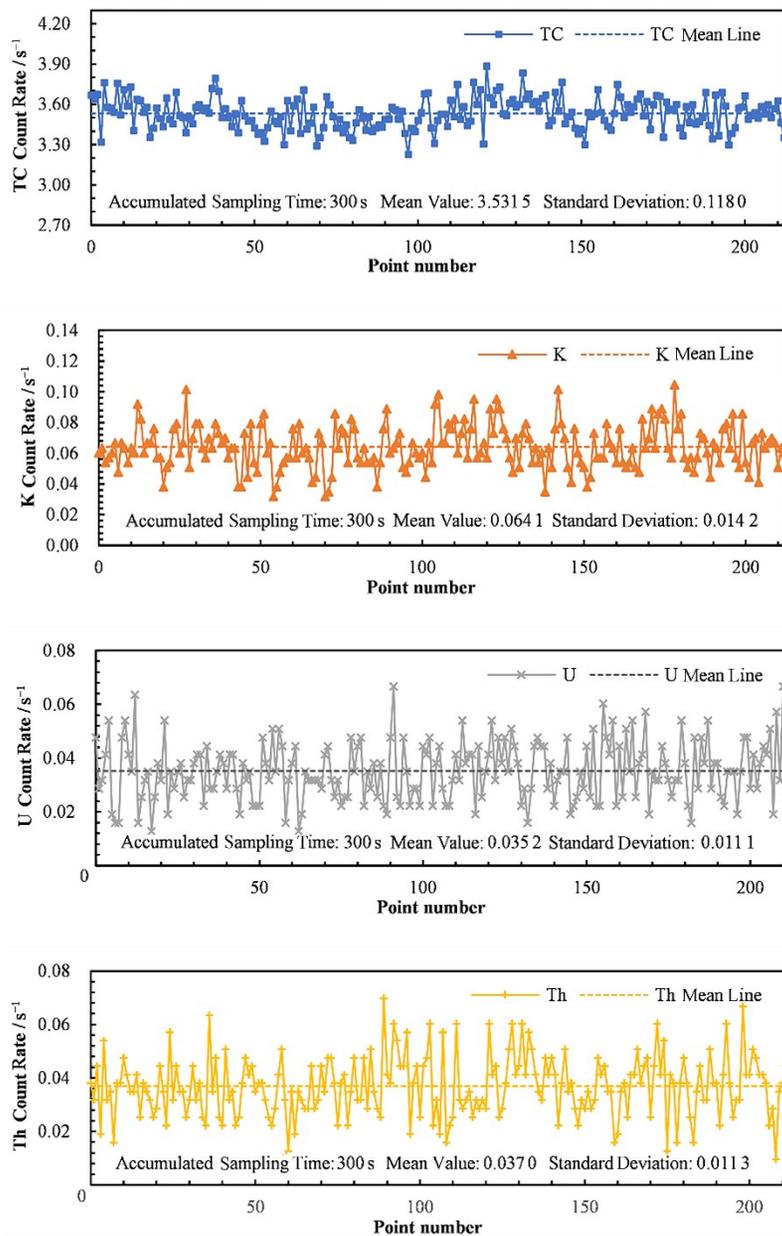


图 14 TC、K、U 和 Th 窗计数率 300 s 的变化曲线

Fig.14 TC, K, U, and Th window count rate curves for every 300 s of sampling time

¹³⁷Cs dispersion from the Fukushima accident in the world ocean[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2012, **111**: 109 - 115. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.12.001.

6 刘艳芳, 刘军伟. 日本拟将福岛核废水直排太平洋[J]. 生态经济, 2019, **35**(11): 1 - 4.
LIU Yanfang, LIU Junwei. Japan plans to discharge Fukushima nuclear wastewater directly into the Pacific Ocean[J]. Ecological Economy, 2019, **35**(11): 1 - 4.

7 余雯, 李奕良, 何建华, 等. 海洋核应急情况下的监测项目和检测方法[J]. 辐射防护, 2013, **33**(1): 49 - 53.
YU Wen, LI Yiliang, HE Jianhua, *et al.* Marine radioactivity monitoring program and analysis-detection methods in the nuclear emergency situation[J]. Radiation Protection, 2013, **33**(1): 49 - 53.

8 米宇豪, 马豪, 曾志, 等. 基于极低本底 γ 谱分析的海水直接测量研究[J]. 辐射防护, 2019, **39**(6): 456 - 462.
MI Yuhao, MA Hao, ZENG Zhi, *et al.* Study on direct seawater measurement by ultra-low background gamma spectrometry[J]. Radiation Protection, 2019, **39**(6): 456 - 462.

9 赵绍华, 侯胜利, 许江, 等. 海洋走航式放射性探测仪的研制与试验[J]. 海洋通报, 2012, **31**(1): 88 - 93. DOI: 10.

- 3969/j.issn.1001-6392.2012.01.015.
ZHAO Shaohua, HOU Shengli, XU Jiang, *et al.* Research and experiment of marine underway radioactive detecting instrument[J]. Marine Science Bulletin, 2012, **31**(1): 88 - 93. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6392.2012.01.015.
- 10 吴丙伟, 张颖颖, 刘岩, 等. 基于大浮标的海洋放射性原位监测系统研究[J]. 海洋技术学报, 2019, **38**(3): 51 - 58. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2019.03.009.
WU Bingwei, ZHANG Yingying, LIU Yan, *et al.* Study on the in-situ system for monitoring marine radioactivity based on large buoy[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, **38**(3): 51 - 58. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2019.03.009.
- 11 徐园, 刘倍, 王希涛, 等. 基于NaI的在线水体 γ 放射性监测系统的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2018, **38**(5): 620 - 624.
XU Yuan, LIU Bei, WANG Xitao, *et al.* Development of an on-line water γ radioactivity monitoring system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2018, **38**(5): 620 - 624.
- 12 Tsabaris C. Monitoring natural and artificial radioactivity enhancement in the Aegean Sea using floating measuring systems[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2008, **66**(11): 1599 - 1603. DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.01.020.
- 13 侯胜利, 刘海生, 王南萍. 海洋拖曳式 γ 能谱仪在渤海的应用[J]. 地球科学, 2007, **32**(4): 528 - 532. DOI: 10.3321/j.issn:1000-2383.2007.04.014.
HOU Shengli, LIU Haisheng, WANG Nanping. The application of the marine towed gamma-ray spectrometer in Bohai Ocean[J]. Earth Science, 2007, **32**(4): 528 - 532. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-2383.2007.04.014.
- 14 曾志, 苏健, 衣宏昌, 等. 海水放射性监测装置研制及初步测试结果[J]. 辐射防护, 2013, **33**(1): 46 - 48, 53.
ZENG Zhi, SU Jian, YI Hongchang, *et al.* Development of a seawater radioactivity monitoring system and its preliminary test results[J]. Radiation Protection, 2013, **33**(1): 46 - 48, 53.
- 15 高峰, 张建国, 杨翊方, 等. 水下 γ 能谱测量系统研究现状及其发展前景[J]. 核电子学与探测技术, 2013, **33**(11): 1396 - 1400. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.11.025.
GAO Feng, ZHANG Jianguo, YANG Yifang, *et al.* The research status and development prospects of the underwater gamma-spectrometer system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, **33**(11): 1396 - 1400. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.11.025.
- 16 郭生良, 熊茂淋, 葛良全, 等. 水体在线放射性测量系统阵列溴化铯闪烁探测装置优化[J]. 核技术, 2021, **44**(11): 110203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110203.
GUO Shengliang, XIONG Maolin, GE Liangquan, *et al.* Optimization of array CeBr₃ scintillation detection device for water on-line radioactivity measurement system[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(11): 110203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110203.
- 17 郭生良, 向叶舟, 葛良全, 等. 水体放射性在线监测系统校准装置设计[J]. 核技术, 2023, **46**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010401.
GUO Shengliang, XIANG Yezhou, GE Liangquan, *et al.* Design of calibration device for real-time on-line monitoring system of water radioactivity[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010401.