

# 西安长安区地热水氡及其相关指标研究

任琳, 曹建科, 石滨, 刘佳宜, 马杨, 卢新卫

陕西师范大学 旅游与环境学院 陕西 西安 710062

中图分类号: TL75<sup>+</sup>1 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2014)03-0215-04

**摘要:** 目的 陕西关中地热资源丰富, 开发利用广泛, 了解西安南郊长安区地热温泉水开发利用对室内环境及人体健康的影响。方法 通过对西安市长安区地热温泉水样的采集, 应用 FD-125 氡钍分析仪测定地热温泉水中氡的浓度, 应用 Tracerlab crs-z-s 离子色谱分析仪测定温泉水中阴阳离子的浓度。结果 发现长安区不同地方的温泉水中氡含量水平差异较大, 区内西北政法大学等高校和滦镇、东大街各种渔场的温泉水中的氡含量较高, 氡含量最高达  $142.94 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ , 同时发现离子浓度水平总体偏高。结论 使用这些地方的温泉水会对人体产生一定剂量的辐射, 应加强防护措施; 温泉水中氡浓度与离子浓度呈正相关关系。

**关键词:** 地热温泉水; 氡浓度; 辐射危害; 离子浓度; 西安

DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.03.009

**Radon Concentration and Other Parameters in Underground Hotwater of Chang'an District of Xi'an.** REN Lin, CAO Jian-ke, SHI Bin, LIU Jia-yi, MA Yang, LU Xin-wei. School of Tourism and Environment, Shanxi Normal University, Xi'an 710062 China.

Corresponding Author: LU Xin-wei, E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

**Abstract:** **Objective** Object Geothermal resource is very rich in central Shaanxi and is widely exploited presently. The object of the study is to know the effect of geothermal resource exploiting to indoor environment and people health. **Methods** The concentrations of radon and ions in geothermal water were measured by FD-125 Rn-analysis meter and Tracerlab crs-z-s ion analyzer, respectively. **Results** The measurement results indicate that the radon concentration is various in the geothermal water from different area and the radon concentrations in the water from Northwest University of Politics & Law, Luanzhen and fisheries of Dongdazhen are high with the maximum of  $142.94 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ . The ions concentration in the studied water samples are relatively high. **Conclusion** The usage of high radon geothermal water would cause radiation hazard to people and radon concentration is positive correlation with ion concentration. The radiation protection measurement of geothermal usage should be strengthened.

**Key words:** Geothermal Hot Spring Water; Radon Concentration; Radiation Hazard; Ion Concentration; Xi'an

氡( $^{222}\text{Rn}$ )是广泛存在于人类生活和工作环境的无色无味的天然放射性惰性气体,人们受到氡及其子体的照射约占天然照射的 50%<sup>[1]</sup>。长期吸入高浓度氡可导致肺癌、白血病、皮肤病等疾病<sup>[2]</sup>。由于氡可以溶解于水,并在水中聚集。所以,水中氡对人体健康的影响倍受关注<sup>[2-10]</sup>。近年来的研究表明<sup>[11]</sup>,温泉水中的氡在水使用过程中会逸散出来,从而影响室内空气质量和人体健康。不同类型水体中氡的含量差异较大,江、河、湖等地表水中氡的浓度相对较低,而地下水、温泉水中氡含量相对较高。

近年来,国内外对地热温泉水中氡的浓度进行了大量的研究<sup>[12-16]</sup>,而秦岭北麓,关中盆地的地热温泉水中氡的研究较少,本文对西安市长安区地热温泉水

中氡的含量及离子浓度水平进行了系统的测量分析。

## 1 材料与方法

**1.1 研究区域概况与样品采集** 研究区域为西安市长安区(图 1)。长安区位于  $108^{\circ}38' \sim 109^{\circ}14' \text{E}$ ,  $33^{\circ}47' \sim 34^{\circ}18' \text{N}$ ,属于暖温带半湿润季风气候区,雨量适中,四季分明。地处关中平原腹地、秦岭北麓,从西和南两个方向环拥西安市区。该区地貌类型丰富,包括山地、川地、塬地、平原等。总面积  $1590.12 \text{ km}^2$ 。地势大体东南高西北低,南北长 55 km,东西宽 52 km。全区最低点位于沣河滩地,海拔 384.7 m,最高点位于光头山,海拔 2886.9 m。城区距西安市中心 8.7 km。

根据长安区的地形、地貌等特点,在地热温泉分布的地方均匀布设采样点 16 个,采集温泉水样 80 个。水样采集使用 600 mL 的塑料瓶。采样前,使用被采水

基金项目: 国家大学生创新创业计划项目资助(201210781078)

作者简介: 任琳(1991-),男,从事环境质量评价研究。

通讯作者: 卢新卫,教授, E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn.

样清洗采样瓶 3~5 次,打开水龙头让水缓慢自然畅流 10 min 左右,然后采集满瓶水样,每个样采集 5 瓶。采样后密封瓶口,带回实验室及时测量。运输过程中,避免大的颠簸振动。



图 1 研究区采样点分布

1.2 水中氡及阴阳离子含量测定 水中氡的测量按照测量方式分为瞬时测量、累积测量和连续测量<sup>[17]</sup>。本研究采用连续测量方法,所用仪器为 FD-125 氡钍分析仪。水氡测量时,每个样品测量 3 次,取平均值作为水样中氡的浓度。水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量应用 Tracerlab crs-z-s 离子色谱分析仪测定<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

2.1 西安长安区地热温泉水中氡的含量 西安长安区地热温泉水中氡浓度见表 1。由表 1 可见,长安区地热温泉水的氡浓度范围是 1.05~238.51  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,最大相差 227.15 倍,这与温泉水成因和该地地质构造有关,因为长安区位于秦岭北麓,地质构造复杂,地下热水的赋存形式存在较大差异,且区内有断裂带经过。经过分析,发现西北政法大学、西北饭店、西安外国语大学、西安电子科技大学、滦镇和东大等地的温泉水氡浓度较其他采样点高,尤其是东大镇渔乐庄园的温泉氡浓度达到 142.94  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (图 2)。这几处温泉分布的地方与长安区内的断裂带基本吻合,说明靠近断裂带的地方氡浓度有增高的趋势。通过对温泉水样进行酸碱测定,发现温泉水的 pH 值介于 7.68~9.05,说明长安区地热温泉水水质均呈碱性。

对比同处地点的井水氡浓度,由表 2 可见,井水中氡浓度和温泉水中氡浓度的值几乎相差一个数量级,说明使用温泉水是人们平时接受氡及其子体的辐射不可忽视的一个方面,氡浓度相差之大应引起人们的高度重视。

表 1 西安长安区地热温泉水中氡的浓度

采样点	样品数	$\text{Rn}(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$		pH 值	电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	采样点分布 (图 1 中)
		范围	平均值			
王寺村	5	1.76~3.59	2.67	8.47	1 338	1
马王镇大众温泉	5	11.06~18.21	14.61	7.91	1 478	2
郭杜镇温泉	5	7.07~10.52	8.79	7.68	883	3
西北政法大学	5	11.44~57.01	41.69	7.73	266	4
西北饭店地热井	5	25.30~52.25	37.71	9.05	562	5
西安外国语大学	5	12.16~136.11	63.15	7.69	1 739	6
西安电子科技大学	5	49.17~65.27	57.22	8.73	1 111	7
培华学院	5	4.16~8.84	6.50	8.04	1 864	8
下北良村	5	10.66~24.09	18.75	7.77	691	9
杜曲镇温泉	5	3.23~3.67	3.45	8.81	814	10
滦镇温泉	5	73.32~91.76	82.54	8.83	823	11
白石镇内苑村	5	1.86~7.68	5.39	8.78	692	12
子午街办北豆角村	5	9.69~16.55	11.35	8.79	04	13
东大镇渔乐庄园	5	107.24~238.51	142.94	8.83	635	14
西北工业大学	5	1.05~31.41	18.05	8.86	631	15
太乙宫镇温泉	5	1.22~4.92	3.07	8.62	790	16
长安区水样平均值	80	1.05~238.51	28.77	8.41	945	-



图 2 长安区地热温泉水氡浓度等值线分布图

表 2 西安东南郊饮用水中氡的浓度

采样点	井深 (m)	样品数	氡浓度 ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ )	范围均值 ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ )
少陵塬东韦村	20	3	243.5~411.9	320.6
少陵塬西兆余村	57	3	401.8~429.8	419.0
少陵塬蕉村	20	3	309.7~531.9	414.1
少陵塬韩家湾村	24	3	326.6~340.0	332.6
少陵塬东兆余村	38	3	66.2~189.7	143.6
少陵塬水样平均值	-	15	66.2~531.9	326.0

注:数据来自文献[19]。

2.2 水氡对室内环境与居民健康的影响 温泉水中的氡主要是通过吸入途径进入人体并产生一定的辐射。使用温泉水时,水中的氡会散逸到空气中,人们通过呼吸吸入一定剂量的氡,氡及其子体会对人体产生一定剂量的辐射。水中氡向室内环境释放的转移量可用下列公式描述<sup>[20]</sup>,

$$C_a = C_w \cdot W \cdot e / (V \cdot \lambda_e) \quad (1)$$

式中:  $C_a$  为室内生活用水对室内空气氡浓度的贡献( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $C_w$  室内生活用水中氡的浓度( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $W$  家庭用水率( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ );  $V$  室内房间体积

( $m^3$ ) ;  $e$  氡从生活用水向室内空气转移的系数(脱气指数) ;  $\lambda_e$  室内空气交换率( $h^{-1}$ )。设:

$$f = W \cdot e / V \cdot \lambda_e \tag{2}$$

则(1)式可变为  $C_a = f \cdot C_w$ ,  $f$  称为水氡的转换系数或称为水氡的贡献系数。水氡的脱气指数  $e$  通常取 0.5, 室内空气交换率  $\lambda_e$  常见值取  $0.7\ h^{-1}$ , 家庭用水率  $W$  取  $0.05\ m^3 \cdot h^{-1}$ , 室内房间体积  $V$  取  $140\ m^3$ 。通过计算水氡的转换系数  $f$  为  $2.55 \times 10^{-4}$ 。应用水中氡的转换系数  $f$  可计算出西安长安区温泉水使用对室内氡浓度的贡献(表 3)。室内环境中氡衰变后所形成的衰变子体经呼吸作用进入人体, 各种射线对机体的危害程度通过剂量当量来描述其对人体的辐射危害。室内环境中氡子体所产生的人均年剂量当量  $H_e$  为<sup>[12]</sup>

表 3 西安长安区温泉水中氡所致公众年有效剂量

温泉点	Rn( kBq · m <sup>-3</sup> )		Rn 贡献值 ( kBq · m <sup>-3</sup> )	年剂量当量 ( μSv ,室内滞留因子取 0.6) 成人( ×10 <sup>-6</sup> ) 儿童( ×10 <sup>-6</sup> )		年剂量当量 ( μSv ,室内滞留因子取 0.8) 成人( ×10 <sup>-6</sup> ) 儿童( ×10 <sup>-6</sup> )	
	范围	平均值					
王寺村	1.76 ~ 3.59	2.67	0.68	14.31	21.47	19.09	28.63
马王镇大众温泉	11.06 ~ 18.21	14.61	3.73	78.33	117.49	104.43	156.65
郭杜镇温泉	7.07 ~ 10.52	8.79	2.24	47.12	70.69	62.83	94.25
西北政法大学	11.44 ~ 57.01	41.69	10.63	223.51	335.26	298.01	447.01
西北饭店地热井	25.30 ~ 52.25	37.71	9.62	202.17	303.25	269.56	404.34
西安外国语大学	12.16 ~ 136.11	63.15	16.10	338.55	507.83	451.41	677.11
西安电子科技大学	49.17 ~ 65.27	57.22	14.59	306.76	460.14	409.02	613.53
培华学院	4.16 ~ 8.84	6.50	1.66	34.85	52.27	46.46	69.69
下北良村	10.66 ~ 24.09	18.75	4.78	100.52	150.78	134.03	201.04
杜曲镇温泉	3.23 ~ 3.67	3.45	0.88	18.50	27.74	24.66	36.99
滦镇温泉	73.32 ~ 91.76	82.54	21.05	442.51	663.76	590.01	885.01
白石镇内苑村	1.86 ~ 7.68	5.39	1.37	28.90	43.34	38.53	57.79
子午街办北豆角村	9.69 ~ 16.55	11.35	2.89	60.85	91.27	81.13	121.70
东大镇渔乐庄园	107.24 ~ 238.51	142.94	36.45	766.32	1 149.48	1 021.76	1 532.64
西北工业大学	1.05 ~ 31.41	18.05	4.60	96.77	145.15	129.02	193.54
太乙宫镇温泉	1.22 ~ 4.92	3.07	0.78	16.46	24.69	21.94	32.92
长安区水样平均值	1.05 ~ 238.51	28.77	7.74	173.53	260.29	231.37	347.05

3 西安长安区地热温泉水中氡与阴阳离子浓度的关系

长安区 16 个温泉点的地热温泉水样阳离子和阴离子含量测试结果见表 4 和表 5。温泉水 Rn 浓度与四种阳离子(  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  ) 浓度总和的相关系数为  $r=0.724$ , 介于强相关指标 0.6 ~ 0.8 之间, 说明温泉水中 Rn 浓度与阳离子(  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  ) 浓度呈强相关关系。温泉水中 Rn 浓度与四种阴离子(  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  ) 浓度总和的相关系数为  $r=0.535$ , 介于中等程度相关指标 0.4 ~ 0.6 之间, 说明温泉水中 Rn 浓度与阴离子(  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  ) 浓度呈中等相关关系。经过计算, 求得温泉水中 Rn 浓度与八种离子(  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  ) 浓度总和的相关系数为  $r=0.563$ , 再次说明温泉水中 Rn 浓度与所含离子浓度呈正相关关系。

$$H_e = 8\ 760 \times q \times f_{in} \times C_{in} \tag{3}$$

式中: 8 760 为一年的小时数;  $q$  为室内居留因子, 取 0.6 ~ 0.8;  $f_{in}$  为室内氡子体剂量转换因子, 成人 为  $1.0 \times 10^{-8}\ Sv/(Bq \cdot h \cdot m^{-3})$ , 儿童为  $1.5 \times 10^{-8}\ Sv/(Bq \cdot h \cdot m^{-3})$ ;  $C_{in}$  为室内平衡等效氡浓度, 其值为室内氡浓度与平衡因子的乘积, 室内平衡因子取 0.4。因此, 在室内氡浓度测定的情况下, 可初步估算出氡子体对人体的年有效剂量值。

根据以上公式计算出了西安市长安区地热温泉水中氡对公众所致年有效剂量, 当室内滞留因子为 0.6 时, 其值范围介于 14.31 ~ 1 149.48  $\mu Sv \cdot a^{-1}$ 。当室内滞留因子为 0.8 时, 其值范围介于 19.09 ~ 1 532.64  $\mu Sv \cdot a^{-1}$ (表 3)。

表 4 长安区地热温泉水 Rn 与阳离子

温泉点	Rn 浓度 ( $kBq \cdot m^{-3}$ )	温泉水中阳离子浓度( $mg/L$ )				总和 ( $mg/L$ )
		$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	
王寺村	2.67	2.47	-0.54	-0.16	0.12	1.90
马王镇大众温泉	14.61	116.37	47.27	17.66	77.43	258.74
郭杜温泉	8.79	53.91	8.87	20.37	80.44	163.59
西北政法大学	41.69	303.28	32.28	1.94	30.90	368.41
西北饭店地热井	37.71	56.39	1.61	-0.17	2.83	60.66
西安外国语大学	63.15	179.53	20.00	1.39	17.32	218.24
西安电子科技大学	57.22	102.81	8.10	0.09	12.51	123.51
培华学院	6.50	4.08	-0.41	0.05	1.04	4.75
下北良村	18.75	34.37	24.11	11.59	78.96	149.04
杜曲镇温泉	3.45	70.87	7.58	-0.06	12.29	90.67
滦镇温泉	82.54	79.43	4.00	0.06	7.37	90.86
白石镇内苑村	5.39	60.28	10.91	0.04	11.62	82.85
子午街办北豆角村	11.35	69.57	4.65	0.03	11.78	86.03
东大镇渔乐庄园	142.94	56.31	6.26	0.02	10.60	73.19
西北工业大学	18.05	56.19	5.13	0.02	10.81	72.16
太乙宫镇温泉	3.07	68.23	9.41	0.04	12.13	89.81

表 5 长安区地热温泉水 Rn 与阴离子

温泉点	Rn 浓度 ( $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ )	温泉水中阴离子浓度 (mg/L)				总和 (mg/L)
		$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	
王寺村	2.67	2.28	13.31	1.97	16.68	34.24
马王镇大众温泉	14.61	4.72	153.18	32.14	198.04	388.09
郭杜镇温泉	8.79	11.30	55.29	23.39	151.29	241.27
西北政法大学	41.69	8.89	126.51	12.68	1252.21	1400.30
西北饭店地热井	37.71	4.53	11.07	4.13	78.70	98.43
西安外国语大学	63.15	6.86	66.50	0.80	507.68	581.84
西安电子科技大学	57.22	11.48	86.42	1.28	321.44	420.63
培华学院	6.50	2.17	18.63	2.24	127.46	150.49
下北良村	18.75	0.24	1.02	2.05	5.11	8.42
杜曲镇温泉	3.45	15.21	39.88	1.63	246.88	303.60
滦镇温泉	82.54	13.93	32.89	2.21	196.42	245.44
白石镇内苑村	5.39	3.55	7.65	0.80	54.18	66.19
子午街办北豆角村	11.35	14.61	39.06	0.84	245.98	300.49
东大渔乐庄园	142.94	11.91	25.19	0.83	171.57	209.49
西北工业大学	18.05	12.21	34.50	0.86	140.26	187.84
太乙宫镇温泉	3.07	14.59	38.26	2.32	238.40	293.58

#### 4 结论与建议

长安区地热温泉水中的氡浓度差异较大,其中在西北政法大学、西安外国语大学等高校和滦镇、东大镇渔乐庄园等地的温泉水氡浓度较高,其他地方镇或村子中分布的温泉氡浓度较低。长安区地热温泉水中氡的浓度对室内氡有一定的贡献。其中西北政法大学等高校和滦镇、东大镇渔乐庄园等地的温泉水对室内空气中氡浓度贡献较大,其中东大镇渔乐庄园温泉水贡献值高达  $36.45 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。长安区地热温泉水中氡浓度与阴阳离子浓度之间存在正相关关系。

长安区位于秦岭北麓,区内地质构造复杂,有地壳断裂带分布,不同地方的温泉水分布在不同的热储层当中,水中所含氡及其阴阳离子含量存在一定的差异。对于高氡温泉水的使用应采取一定的防护措施,降低氡及其子体对人体产生的辐射剂量,尽量减少其对人体健康的危害,具体建议如下:①通过实验研究,长安区内的部分高校,如西北政法大学、西安电子科技大学、西安外国语大学等,这些高校都有自备地热井,其地热温泉水主要为在校生和学校家属区的洗浴所用。高校是人流比较密集的地方,且以青年人为主,对于学校来讲,保障青年大学生的身体健康尤为重要。对于氡含量较高的温泉洗浴水可通过活性炭吸附、水氡脱气装置等措施除去水中氡;②在长安区东大镇分布有很多的温泉度假的地方,如东大渔乐庄园、特种渔场及东大秦龙温泉宾馆等,经研究,这些地方的地热温泉水氡浓度较高。由于这些地方是城市人们周末、假期常去的地方以及大量鱼类养殖区(很多渔场养鱼用的是地热温泉水),因此,为保证游客及城市居民身体健康,应采取一定的措施降低温泉水中的氡浓度,防止使用温泉水的过程中氡大量散逸到室内空气中,认真评估使用温泉水养鱼的科学性,减少氡对人体产生的危害;③西安市相关部门应定期组织环境专家对长安县各大高校及东大温泉度假村等人

流密集地区的温泉水进行化验分析,时时通报,以此来确保这些地方的人们在使用地热温泉水时不会受到高氡的辐射,保证人们生活环境的清洁。

#### 参考文献

- [1] UNSCEAR. Exposures from natural sources of radiation [R]. New York: United Nations, 1998.
- [2] 李晓辉,申仲华,李建华. 水中氡的危害及监管现状[J]. 现代预防医学, 2005, 32(10): 1313-1323.
- [3] Zalewski M, Karpinska M, Mnich Z, et al. Study of  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in drinking water in the north-eastern hydroregions of Poland [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53(2): 167-173.
- [4] Choubey VM, Bartarya SK, Ramola RC. Radon in ground water of eastern Doon valley, Outer Himalaya [J]. Radiation Measurements, 2003, 36(1-6): 401-405.
- [5] 姜建康, 龚玉梅. 聊城市 1999-2001 年放射工作人员个人剂量监测 [J]. 中国辐射卫生, 2002, 11(2): 125.
- [6] 李红环, 林智, 李志红. 海南省放射工作人员个人剂量水平分析 [J]. 中国辐射卫生, 2003, 12(1): 21.
- [7] 毕治英, 赫泉. 温泉中氡浓度调查 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2002, 22(3): 218.
- [8] 邓志宏, 黄兆慧, 曾庆祥, 等. 咸宁温泉地区环境辐射水平及放射卫生学评价 [J]. 中国辐射卫生, 2004, 13(1): 8-10.
- [9] 武国亮, 唐丽, 樊芳, 等. 职业病危害因素放射性氡监测实施方案编制探讨 [J]. 中国辐射卫生, 2013, 22(4): 412-413.
- [10] 赵锋. 使用地热水淋浴和沐浴对室内氡子体平衡因子的影响 [J]. 中国辐射卫生, 2013, 22(4): 424-426.
- [11] Vogianis E, Niaounakis M, Halvadakis CP. Contribution of  $^{222}\text{Rn}$ -bearing water to the occupational exposure in thermal baths [J]. Environment International, 2004, 30(5): 621-629.
- [12] 冯玉水, 孟文斌, 秦长珠. 辽宁省某温泉疗养院氡浓度的测量 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 1994, 14(3): 182-185.
- [13] 李树庆, 陈虹, 吴洪竹, 等. 温泉水放射性水平及泉水浴房内空气中氡浓度调查 [J]. 工业卫生与职业病, 1994, 20(1): 40.
- [14] 王燮华, 姜会侠. 地热、温泉水利用中氡的防护 [J]. 辐射防护, 1989, 9(1): 72-75.
- [15] Horvath A, Bohus LO, Urbani F, et al. Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2000, 47(2): 127-133.
- [16] Sabol J, Weng PS, Mao CH. Monitoring of  $^{222}\text{Rn}$  in Taiwanese hot spring spa waters using a modified electrets ionchamber method [J]. Health Physics, 1995, 68(1): 100-104.
- [17] Freyer K, Treutler HC, Dehnert J, et al. Sampling and Measurement of Radon-222 in Water [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1997, 37(3): 327-337.
- [18] Lu Xinwei, Li Loretta Y, Li Nan, et al. Chemical characteristics of spring rainwater of Xi'an city, NW China [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(28): 5058-5063.
- [19] 屈雅斋, 卢新卫. 西安东南郊居民饮用井水中氡的含量水平 [J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(5): 993-994.
- [20] Nazaroff WW, Doyle SM, Nero AV, et al. Potable Water as a source of airborne  $^{222}\text{Rn}$  in U. S. dwellings [J]. Health Physics, 1987, 52(3): 281-295.

收稿日期: 2013-12-24