

阚宝祥,沈钰,戴陈兵,等.浙江省珊溪水库地区土壤 Rn 和 H₂ 地球化学特征[J].地震工程学报,2021,43(6):1310-1316.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1310

KAN Baoxiang, SHEN Yu, DAI Chenbing, et al. Geochemical characteristics of soil gases Rn and H₂ in Shanxi reservoir area, Zhejiang Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1310-1316. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1310

浙江省珊溪水库地区土壤 Rn 和 H₂ 地球化学特征

阚宝祥, 沈钰, 戴陈兵, 曾利萍, 张震峰, 张帆, 于俊谊

(浙江省地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要: 在浙江省珊溪水库地区布设 5 条断层土壤气 Rn 和 H₂ 测线, 并选取 15 个溶解水氡采样测点。测量结果显示, 其中有 3 条土壤气测线上的 Rn 浓度均值超过 70 Bq/L, 土壤 H₂ 测值最高达 1 377 ppm, 水样中溶解氡浓度最高值为 68.3 Bq/L。通过珊溪水库地区历史地震活动和地质构造情况分析, 发现该地区土壤 Rn、H₂ 和溶解水氡的高值分布区均与双溪—焦溪垟断裂 F₁₁₋₃ 分支的空间位置密切相关, 该断裂分支是珊溪水库地区小震活动的发震断裂。另外通过研究发现, 历史震群活动距今时间以及震群活动的频度和强度是影响珊溪水库地区土壤气 Rn 和 H₂ 地球化学特征的重要因素。

关键词: 珊溪水库; 土壤气; 地球化学特征; 震群

中图分类号: P313

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)06-1310-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1310

Geochemical characteristics of soil gases Rn and H₂ in Shanxi reservoir area, Zhejiang Province

KAN Baoxiang, SHEN Yu, DAI Chenbing, ZENG Liping,

ZHANG Zhenfeng, ZHANG Fan, YU Junyi

(Zhejiang Earthquake Agency, Hangzhou 310013, Zhejiang, China)

Abstract: In Shanxi reservoir area of Zhejiang Province, this paper set up 5 survey lines for fault soil gases Rn and H₂, then selected 15 sampling points for dissolved water radon. The results showed that the mean value of Rn concentrations in 3 soil gas lines is over 70 Bq/L, the maximum value of soil H₂ is 1 377 ppm, and the maximum value of dissolved radon concentration in water samples is 68.3 Bq/L. Based on the analysis of historical seismicity and geological structure of the study area, it is found that the high value distribution areas of soil Rn, H₂, and dissolved water radon are closely related to the spatial location of F₁₁₋₃ branch of the Shuangxi—Jiaoxiyang fault, which is the seismogenic fault of small earthquakes in the study area. In addition, we also found that the occurrence time, the frequency, and the intensity of historical earthquake swarm are im-

收稿日期: 2020-06-05

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划青年项目(XH20022Y); 中国地震局地震科技星火计划公关项目(XH191101)

第一作者简介: 阚宝祥(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事地下流体力学研究。E-mail: baoliangkan@163.com。

portant factors affecting the geochemical characteristics of soil gases Rn and H₂ in Shanxi reservoir area.

Keywords: Shanxi reservoir; soil gas; geochemical characteristics; earthquake swarm

0 引言

断层土壤气探测是以断层位置的土壤气体组分特征及其含量变化为对象的地球化学调查技术,因其可以反映断层活动性特征而受到国内外地震学家的广泛关注^[1-4]。大量研究结果表明^[5-8],地下土壤气体中 Rn、H₂ 和 CO₂ 等浓度变化能够客观、真实地反映周围介质地球物理场的变化。断层土壤气地球化学特征的变化与地震活动及其孕震过程密切相关^[9],当地下构造介质应力状态发生变化时,赋存在地下深处的地质流体将沿着孔隙度和连通性较高的构造破碎带、裂缝或岩脉等快速迁移至地表土壤,甚至释放到大气中。杜建国等^[10]通过分析八宝山断裂带逸出 Rn 的地球化学特征,发现断层气特征分布与构造有关,映震率高达 70%。张骏等^[11]通过分析大柳树坝址断裂带内断层气 Rn 测量结果,评价了该地区地震活动强弱顺序及活动水平。王博等^[12]总结梳理了国内断层 H₂ 的研究现状,认为研究断层 H₂ 对地震预报水平的提高具有重要意义。同时,有研究表明断层土壤气地球化学特征变化受多种因素的影响^[13]。在研究断层气地球化学特征与地震活动的关系时,要充分考虑各种因素对断层气探测的干扰。

温州市珊溪水库地区是浙江省近几年来小震活动最为频繁的地区,自 2000 年珊溪水库蓄水以来共发生过 3 次显著的震群活动。前人在该地区开展了大量的地震研究工作^[14-18],对地震活动的发震断层和发震机理有了一定程度的了解,认为双溪—焦溪垵断裂为该地区震群活动的发震断裂。该断裂上的土壤气探测结果揭示,土壤气浓度特征及其变化与断层结构及地震活动具有较好的对应关系^[19]。为进一步研究珊溪水库地区土壤气 Rn 和 H₂ 的地球化学特征,在该地区北东向的江口—汇溪断裂和双溪—焦溪垵断裂东南向延伸段分别布设新的土壤气测线,对断层土壤气进行补充观测研究,同时进行水样溶解 Rn 的浓度测试,并将探测结果与区域地质构造特点和地震活动情况进行对比分析,发现珊溪水库地区土壤气 Rn 和 H₂ 的地球化学特征显著。

1 库区地震环境概况

珊溪水库位于飞云江流域中上游,水库集水面

面积约 1 529 km²,总库容 18.24 亿 m³^[17]。水库周围高山环抱,地势西高东低,呈阶梯状递减。水库区主要存在 NW 向和 NE 向展布的两组断裂,这些断裂以陡倾角逆断层、逆走滑断层为主,有少量 NW 向断裂为正断层。单条断裂长度一般大于 10 km,切割深度可达 5 km 以上。NE 向与 NW 向的两组断裂在汇溪至东湾坑一带交汇。

NE 向断裂走向 NE40°~60°,倾向以 NW 为主,倾角 60°~80°,多为逆冲走滑断裂。断裂带宽约 20~30 m,带内挤压构造透镜体、劈理发育,形成于前中生代。破碎带剥蚀较浅,往往被 NW 向断裂切割。

珊溪水库地区是目前为止浙江省小震活动最为频繁的地区,地震活动具有显著的水库诱发特征。地震绝大部分发生在大坝上游的文成县珊溪镇与泰顺县包垵乡交界处的库首区,震中非常集中,震中分布呈现出 NW 向展布的优势方向,优势展布方向与双溪—焦溪垵断裂的走向相近(图 1)。相关研究结果表明^[14-15],2000 年以来 3 丛小震活动的发震断裂均为双溪—焦溪垵断裂。

2 断层土壤气测线布设及测量

珊溪水库地区的断层土壤气探测工作始于 2016 年。前期土壤气背景值探测研究发现历史震群震中区的土壤气 Rn 浓度远高于外围地区^[19]。基于这一分布特征,2017 年初首先在 2014 年震群震中位置的发震断裂上布设了 2 条测线,在 2002 年震群位置布设了 1 条测线,主要测量土壤气 Rn 和 H₂。这些测线都布设在发震断裂的西北段。为研究断层气浓度特征与非发震断裂构造的对应关系,2018 年在双溪—焦溪垵断裂的东南段和 NE 向江口—汇溪断裂各布设了 1 条断层土壤气测线。所有土壤气测线分布如图 2 所示。

本文研究采用的断层气测量仪器和测量方法与文献^[19]相同。2017—2018 年在珊溪水库地区共布设了 5 条断层土壤气测线(图 2),主要测项为土壤气 Rn 和 H₂,获取有效测点各 232 个。

3 土壤气测量结果

将珊溪水库地区 5 条土壤气测线上的 Rn 和 H₂ 测量结果列于表 1,并分别进行分析。

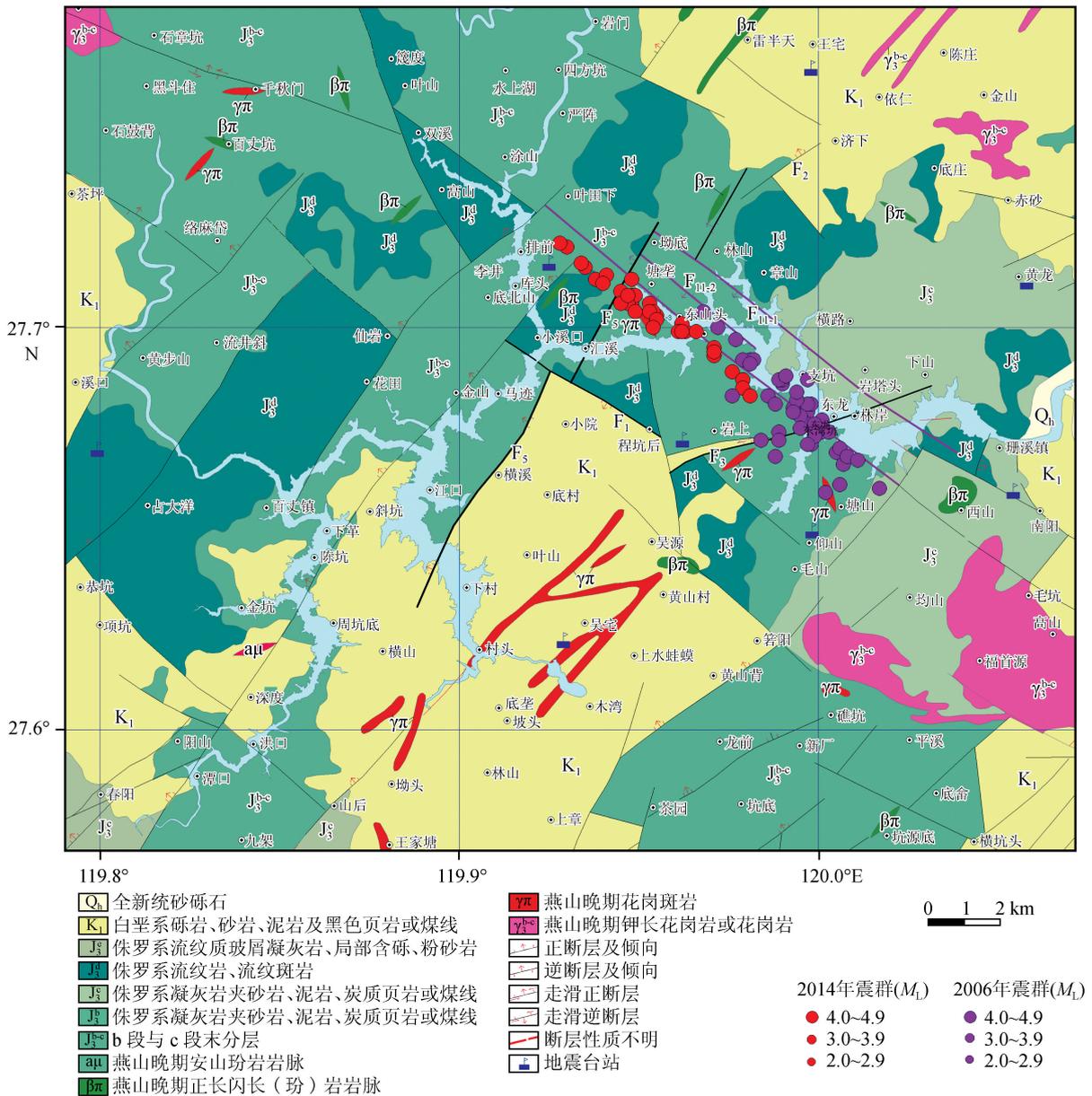


图 1 珊溪水库地区震中分布图

Fig.1 Epicenter distribution map of Shanxi reservoir area

3.1 土壤气 Rn 浓度测值

5 条测线上土壤气 Rn 的平均值范围在 27.2~109 Bq/L,最高值达 330 Bq/L,不同断裂上土壤气的平均值和最高值相差较大。双溪—焦溪垌断裂第 3 个分支上不同位置的土壤气 Rn 浓度均值相差不大(73.8~109 Bq/L),说明该断裂不同位置间存在气体能够快速迁移的通道,使得整个断裂分支上的土壤气 Rn 浓度整体处于相对均衡的状态。塘垄测线(L2)和齐垌测线(L5)位于非发震断裂,土壤气 Rn 浓度均值较低。

3.2 土壤气 H₂ 浓度测值

从表 1 可以看出,土壤气 H₂ 浓度的均值和最

大值均出现在银珠坑测线(L1)上。该区地貌特征虽然比其他地区更具有特殊性(断层出露明显,土层较薄),但地貌特征并不是土壤气浓度特征的主要因素,而是由于该位置断层构造的活动性要强于其他地区。

3.3 银珠坑测线土壤气重复测量结果

银珠坑测线(L1)上断层出露明显,土壤气浓度特征变化显著。2017—2018 年先后对该测线进行了 3 次测量,测得其土壤 Rn 浓度平均值都在 70 Bq/L 以上,最高值均出现在断层破碎带附近。

为消除季节的影响,在 2017 年 1 月和 2018 年 1 月基本相同的时间段对该测线进行重复测量,结

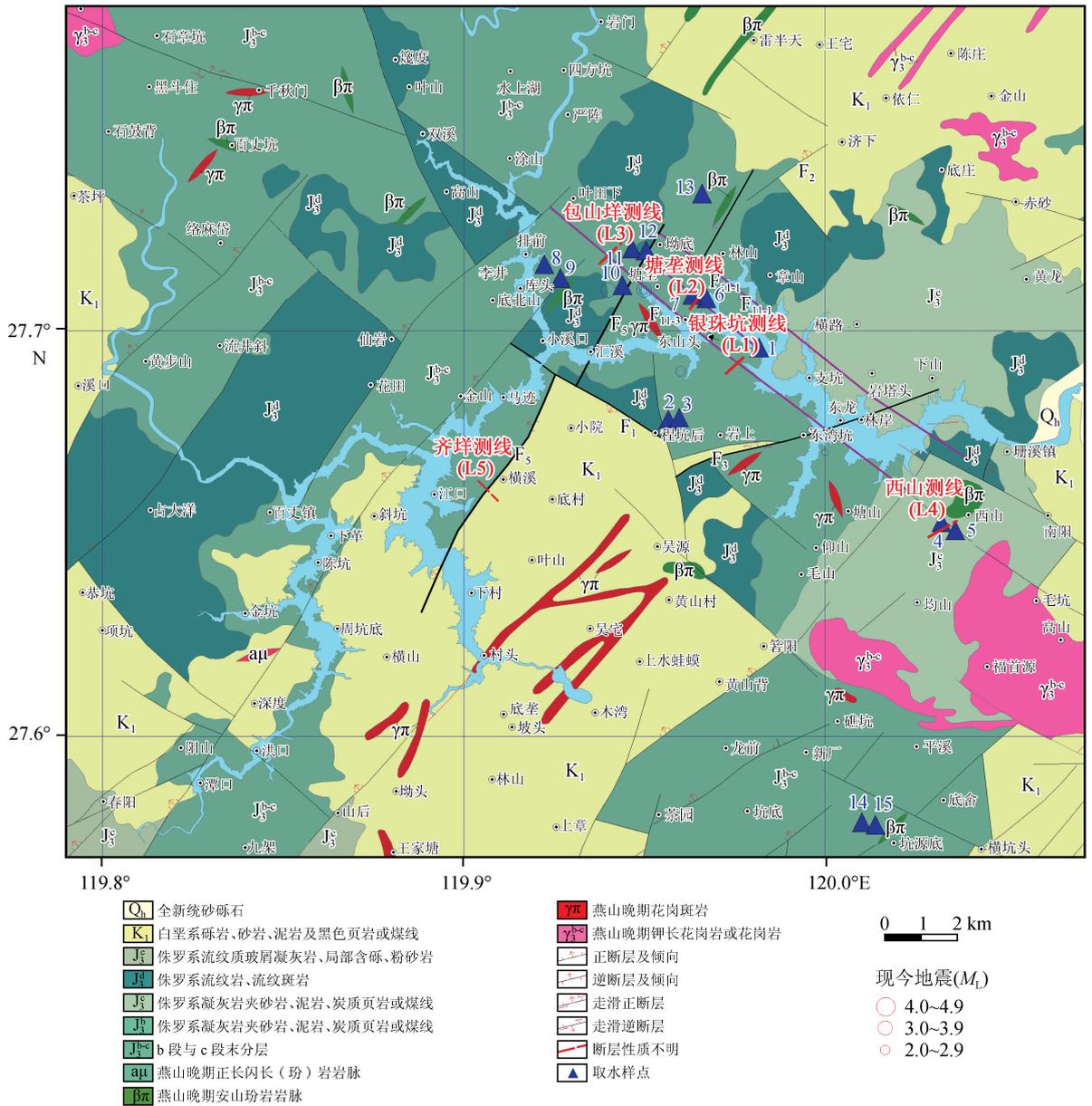


图 2 珊溪水库地区测线分布及取水样点位置图

Fig.2 The survey line distribution and location of water sampling points in Shanxi reservoir area

表 1 珊溪水库地区土壤气 Rn、H₂ 组分浓度测值

Table 1 Measured concentration of Rn and H₂ components of soil gas in Shanxi reservoir area

测线名称	测量时间	测点个数	断裂编码	C _{Rn} /(Bq·L ⁻¹)			C _{H₂} /ppm		
				均值	最大值	最大值/均值	均值	最大值	最大值/均值
银珠坑(L1)	2017-01	37	F ₁₁₋₃	90.0	200	2.2	135	684	5
	2018-01	38	F ₁₁₋₃	109.0	307	2.8	317	666	2.1
	2018-10	24	F ₁₁₋₃	79.0	240	3.0	567	1 377	2.4
塘垄(L2)	2017-01	42	F ₁₁₋₂	32.5	114	3.5	65	188	2.9
包山垟(L3)	2017-01	40	F ₁₁₋₃	73.8	330	4.5	58	172	3
西山(L4)	2018-01	22	F ₁₁₋₃	78.0	165	2.1	92	426	4.6
齐垟(L5)	2018-01	29	F ₅	27.2	152	5.6	83	327	3.9

注:断裂编号 F₁₁₋₃ (i=1,2,3)代表双溪—焦溪垟发震断裂的 3 个近平行的分支, F₅代表 NE 向江口—汇溪断裂。

果如图 3 所示。图中土壤气 Rn 测值为均值,土壤气 H₂ 测值为最高值。通过图 3 可以看出,两次测

量的土壤气 Rn 和 H₂ 浓度变化特征具有较好的一致性,且均与断层要素(破碎带和岩脉)位置具有较

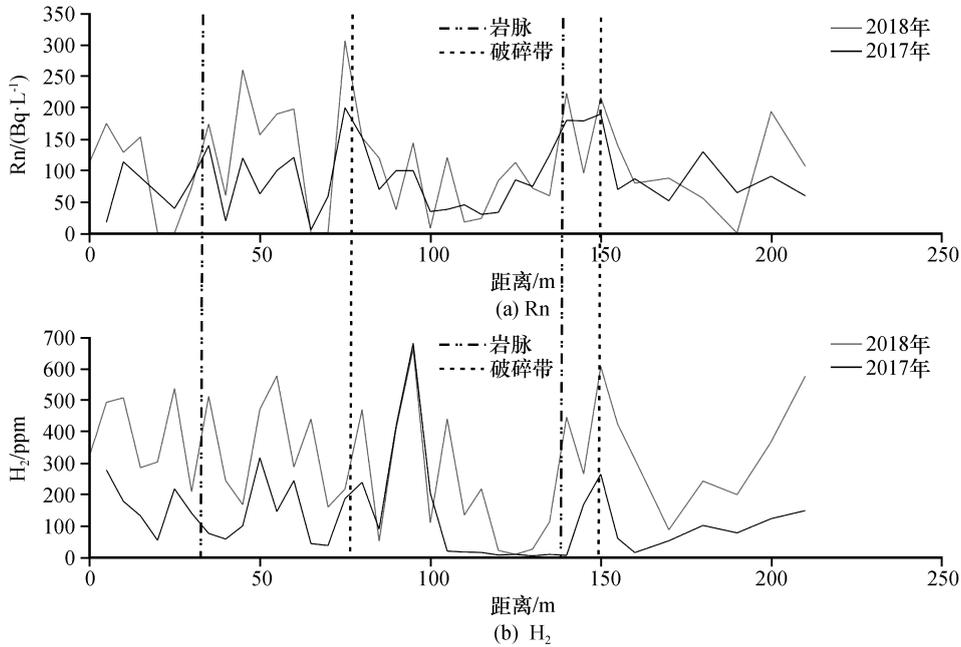


图3 银珠坑测线土壤 Rn 和 H₂ 重复测量曲线图

Fig.3 The repeated measurement curves of soil Rn and H₂ along Yinzhukeng survey line

好的对应关系。

依据上述测量结果,浙江省地震局于2018年12月在双溪—焦溪垵断裂经过的银珠坑村附近建设完成了泰顺银珠坑断层土壤气观测站,主要包含土壤气 Rn、H₂ 和 CO₂ 共3个测项。

4 库区水样氡浓度测量结果

据温州市国土资源局有关部门介绍,珊溪水库地区大部分为山区,现有地质勘查水井非常少。为研究库区水氡特征,本文采集的大部分水样为山泉水,只有2个水样取自地质勘查水井。另外为了进行对比分析,在山涧小溪中取水样2个。采集的15个水样中,水样类型主要包括山泉水、地下井水和地表水等,采样位置如图1所示。考虑到 Rn 的衰变因素,白天取样后当天晚上进行水氡测试。水氡测试采用 P2000F 型测氡仪及其原装水氡测试配件,具体测试结果列于表2。

由表2可知,水氡测试范围在3~68.3 Bq/L间。珊溪水库地区山泉水的含氡量较高,尤其是双溪—焦溪垵发震断裂附近水样含氡量高于其他地区。水氡测值最高的水样来自双溪—焦溪垵断裂东南端的西山村,其 Rn 浓度高达68.3 Bq/L,此处距2006年震群中最大地震的震中较近,高程相对较低。其次是取自双溪—焦溪垵断裂西北端云湖乡的水样,Rn 浓度为44.9 Bq/L,此处距2014年震群中最大地震的震中较近,高程相对较高。

表2 珊溪水库地区水氡测试结果

Table 2 Results of water radon test in Shanxi reservoir area

取水样点	水样类型	水氡测值 /(Bq·L ⁻¹)	备注
1	山泉	10	
2	山泉	4.9	
3	水井	25.8	银珠坑测线附近
4	山泉	7.4	
5	山泉	68.3	西山村测线附近
6	水井	17.9	
7	山涧溪水	4.1	
8	山泉	21.6	包山垵测线附近
9	山泉	44.9	包山垵测线附近
10	山泉	16	
11	山泉	23	包山垵测线附近
12	山泉	10	
13	山涧溪水	3	
14	温泉	8.8	距库区较远
15	温泉	3.9	距库区较远

5 分析与讨论

为研究珊溪水库地区土壤气分布特征的形成原因,分别将土壤气 Rn 和 H₂ 浓度测量结果与该地区断裂构造和地震活动进行相关性讨论。

5.1 区域断裂构造活动分析

珊溪水库地区小规模断裂构造发育,晚第三纪以来,库区新构造运动主要表现为大面积的间歇性升降运动,以整体性抬升为主,断裂两侧差异活动不

明显,无火山和岩浆活动,地热与地震活动较弱^[18]。

通过土壤气测量结果来看(表 1),构造断裂上的土壤气 Rn 和 H₂ 地球化学特征与断层位置具有较好的空间相关性,即断层破碎带上方的土壤气 Rn 和 H₂ 浓度远高于其他地区,并且随着与破碎带距离的增加浓度呈递减趋势,说明该地区的断裂构造与地下深部的通道依然存在。无地震活动记录的构造断裂附近,土壤气浓度测值整体水平较低,推测非发震构造的断层两盘以整体运动为主,基本不存在相对运动,深部的构造物质向地表迁移的速率较慢。

5.2 区域地震活动分析

自 2000 年以来,珊溪水库地区地震活动的主要发震断裂为双溪—焦溪垵断裂构造。该断裂包含 3 条近平行方向的分支:规模最大的为第 3 条分支(F₁₁₋₃),长度 30 km 左右,为 2006 年和 2014 年震群活动的发震断裂;规模最小的为第 2 条分支(F₁₁₋₂),长度 10 km 左右,为 2002 年震群活动的发震断裂,该震群活动的频度和强度均小于后面 2 次震群活动;该断裂的第 1 条分支(F₁₁₋₁)至今未有地震活动记录。

根据该地区土壤气 Rn 和 H₂ 测量结果,双溪—焦溪垵断裂第 3 分支上的土壤气 Rn 浓度均值是其他断裂的 3~4 倍,尤其是银珠坑测线(L1)和包山垵测线(L3)中土壤气 Rn 的最大值均超过 300 Bq/L,这可能是由于该断裂构造活动性较强,地下深部物质通过断层构造通道迁移到断层附近土壤形成富集,并不断向周围地区扩散所致。

塘垄测线(L2)位于 2002 年震群附近,其土壤气 Rn 和 H₂ 浓度的平均值和最大值均低于双溪—焦溪垵断裂第 3 分支,可能与该测线所处发震断裂分支规模较小且地震活动距今时间较长有关。西山测线(L4)上土壤 Rn 和 H₂ 均值虽然较高,但高值测点较为分散,这可能同样是由于地震活动距今时间较长,气体在土壤内的扩散作用所致。

根据珊溪水库库区范围内水样氡浓度分析结果,两处水氡浓度较高的水样位置均比较靠近两次震群中最大震级地震的震中,说明较大震级的地震活动可能更有利于深部的 Rn 向地表迁移。距离库区较远的两个温泉水样测值仅为 3.9 Bq/L 和 8.8 Bq/L,这可能是由于水样距离发震断裂较远,说明珊溪水库地区的 Rn 浓度特征与发震断裂位置具有显著的对应关系。

另外,通过图 3 可以看出 2018 年 1 月土壤气 Rn 和 H₂ 的测值均高于 2017 年 1 月,据此推测银

珠坑附近断层活动性有所加强。根据对珊溪水库地区历史地震活动的统计分析,2017 年该区发生 0 级以上地震 12 次,最大震级 M_L1.2,2018 年发生 0 级以上地震 26 次,最大震级 M_L1.4。2018 年该区小震频次虽然比 2017 年增加了 1 倍,但小震强度没有增加,且无显著震例对应,因此该区域断层气 Rn 的变化特征与地震的对应关系仍需继续积累资料以进行深入研究。

6 结论

通过珊溪水库地区断层土壤气 Rn 和 H₂ 浓度测量以及水样 Rn 浓度检测,结合前人的研究成果,对该地区土壤气地球化学特征及其成因进行分析,得出以下主要结论:

(1) 研究区土壤气 Rn 和 H₂ 的地球化学特征与区域断裂构造和地震活动密切相关,与地震活动的关系更为密切,尤其是历史地震活动距今时间。历史地震活动距今时间越长,断层破碎带附近的土壤气 Rn 和 H₂ 浓度高值异常越不明显,历史地震距今时间尺度越短,断层破碎带附近的土壤气 Rn 浓度高值异常特征越显著。其次,土壤气 Rn 和 H₂ 的地球化学特征与历史地震活动的频度和强度存在正相关关系。

(2) 土壤气 H₂ 地球化学特征一定程度上受土壤性质和季节的影响,但它们并不是主要控制因素,主要控制因素仍然是地震活动水平和断裂构造。

(3) 双溪—焦溪垵断裂第 3 分支是影响珊溪水库地区土壤气地球化学特征变化的最主要断裂构造。另外,震级大的地震震中位置土壤 Rn 浓度测值较高,说明地下深部 Rn 元素的迁移速率会受到地震震级大小的影响。

致谢:感谢温州市文成县科技局和泰顺县科技局对本文所开展工作的大力支持!

参考文献(References)

- [1] 汪成民,宇文欣,周旭明,等.从断层气测量结果看德都地震[J].中国地震,1989,5(2):57-62.
WANG Chengmin, YUWEN Xin, ZHOU Xuming, et al. Understanding the Dedu earthquake based on the results of fault gas measurement[J]. Earthquake Research in China, 1989, 5(2): 57-62.
- [2] 郁春霞,韩许恒.断层气测量在西安地裂缝勘察中的应用实例分析[J].物探与化探,1998,22(1):76-77,60.
- [3] 刘雷,杜建国,周晓成,等.青海玉树 M_s7.1 地震震后断层流体地球化学连续观测[J].地球物理学进展,2012,27(3):888-893.

- LIU Lei, DU Jianguo, ZHOU Xiaocheng, et al. Continuously observation of fault fluid geochemistry after Yushu $M_s7.1$ earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(3): 888-893.
- [4] 张冠亚, 周晓成, 李营, 等. 怀安盆地北缘断裂东段土壤气体地球化学特征[J]. *地震*, 2015, 35(3): 113-122.
- ZHANG Guanya, ZHOU Xiaocheng, LI Ying, et al. Geochemical characteristics of soil gas in the eastern segment of the north margin fault of the Huaian basin, Hebei Province[J]. *Earthquake*, 2015, 35(3): 113-122.
- [5] 周晓成, 郭文生, 杜建国, 等. 呼和浩特地区隐伏断层土壤气氡、汞地球化学特征[J]. *地震*, 2007, 27(1): 70-76.
- ZHOU Xiaocheng, GUO Wensheng, DU Jianguo, et al. The geochemical characteristics of radon and mercury in the soil gas of buried faults in the Hohhot district[J]. *Earthquake*, 2007, 27(1): 70-76.
- [6] 李营, 杜建国, 王富宽, 等. 延怀盆地土壤气体地球化学特征[J]. *地震学报*, 2009, 31(1): 82-91, 117.
- LI Ying, DU Jianguo, WANG Fukuan, et al. Geochemical characteristics of soil gas in Yanqing—Huailai basin, North China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(1): 82-91, 117.
- [7] 孙小龙, 王广才, 邵志刚, 等. 海原断裂带土壤气与地下水地球化学特征研究[J]. *地学前缘*, 2016, 23(3): 140-150.
- SUN Xiaolong, WANG Guangcai, SHAO Zhigang, et al. Geochemical characteristics of emergent gas and groundwater in Haiyuan fault zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 140-150.
- [8] 周晓成, 王传远, 柴焯章, 等. 海原断裂带东南段土壤气体地球化学特征[J]. *地震地质*, 2011, 33(1): 123-132.
- ZHOU Xiaocheng, WANG Chuanyuan, CHAI Chizhang, et al. The geochemical characteristics of soil gas in the southeastern part of Haiyuan fault[J]. *Seismology and Geology*, 2011, 33(1): 123-132.
- [9] BERNARD P. From the search of ‘precursors’ to the research on ‘crustal transients’[J]. *Tectonophysics*, 2001, 338(3-4): 225-232.
- [10] 杜建国, 宇文欣, 李圣强, 等. 八宝山断裂带逸出氡的地球化学特征及其映震效能[J]. *地震*, 1998, 18(2): 155-162.
- DU Jianguo, YUWEN Xin, LI Shengqiang, et al. The geochemical characteristics of escaped radon from the Babaoshan fault zone and its earthquake reflecting effect[J]. *Earthquake*, 1998, 18(2): 155-162.
- [11] 张骏, 杜东菊, 彭建兵, 等. 断层气体测量在大柳树坝址区断裂活动性研究中的应用[J]. *勘察科学技术*, 1996(6): 23-27.
- ZHANG Jun, DU Dongju, PENG Jianbing, et al. The application of fault gas measurement in the study of rift activity at Daliushu dam site[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1996(6): 23-27.
- [12] 王博, 周永胜. 氢气与断层活动及地震的研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(5): 1921-1929.
- WANG Bo, ZHOU Yongsheng. Review: fault hydrogen mechanism and its interrelation with seismic activity[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(5): 1921-1929.
- [13] 王喜龙, 李营, 杜建国, 等. 首都圈地区土壤气 Rn , Hg , CO_2 地球化学特征及其成因[J]. *地震学报*, 2017, 39(1): 85-101.
- WANG Xilong, LI Ying, DU Jianguo, et al. Geochemical characteristics of soil gases Rn , Hg and CO_2 and their genesis in the capital area of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(1): 85-101.
- [14] 钟羽云, 周昕, 张帆. 水库水位变化与地震活动关系研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2013, 33(2): 35-40.
- ZHONG Yuyun, ZHOU Xin, ZHANG Fan. On relation between reservoir water level changes and seismic activity[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(2): 35-40.
- [15] 朱新运, 张帆, 于俊谊. 浙江珊溪水库地震精细定位及构造研究[J]. *中国地震*, 2010, 26(4): 380-390.
- ZHU Xinyun, ZHANG Fan, YU Junyi. Study on precise positioning and structure of the Shanxi reservoir earthquake, Zhejiang Province[J]. *Earthquake Research in China*, 2010, 26(4): 380-390.
- [16] 钟羽云, 周昕, 张帆, 等. 2006 年温州珊溪水库地震序列特征[J]. *华南地震*, 2007, 27(1): 21-30.
- ZHONG Yuyun, ZHOU Xin, ZHANG Fan, et al. Seismic sequence characteristics of the 2006 Shanxi reservoir earthquake in Wenzhou[J]. *South China Journal of Seismology*, 2007, 27(1): 21-30.
- [17] 钟羽云, 张帆, 赵冬. 珊溪水库 $M_{1.4.6}$ 震群精确定位与发震构造研究[J]. *地震研究*, 2011, 34(2): 158-165.
- ZHONG Yuyun, ZHANG Fan, ZHAO Dong. Precise relocation and seismogenic structure of the Shanxi reservoir earthquake sequence in Wenzhou, Zhejiang Province[J]. *Journal of Seismological Research*, 2011, 34(2): 158-165.
- [18] 钟羽云, 张震峰, 阚宝祥. 珊溪水库地震波速比时空分布特征[J]. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35(5): 871-875.
- ZHONG Yuyun, ZHANG Zhenfeng, KAN Baoxiang. The temporal and spatial distribution characteristics of seismic wave velocity ratio in Shanxi reservoir[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(5): 871-875.
- [19] 阚宝祥, 钟羽云, 沈钰, 等. 温州双溪—焦溪垟断裂土壤 Rn 和 H_2 地球化学特征[J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(8): 823-827.
- KAN Baoxiang, ZHONG Yuyun, SHEN Yu, et al. Geochemical characteristics of radon and hydrogen in soil gas of Shuangxi—Jiaoxiyang fault in Wenzhou[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(8): 823-827.