

云南江川渔村井地下水补给来源分析^{*}

胡小静¹, 付虹^{1♣}, 李利波¹, 李祥²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 江川县地震局, 云南 玉溪 652600)

摘要: 基于水化学特征, 结合井下电视探视和区域地下水相关性分析, 研究了云南江川渔村井的地下水循环状态与补给来源。结果表明: 渔村井地下水补给主要是大气降水, 水体中存在一定的水-岩相互作用成分, 地下水循环深度较大, 因此目前渔村井水质成分所揭示的是地表雨水渗入与深部水-岩相互作用的结果; 该井与其东侧约1.5 km处的星云湖水面高程之间有一定的相关性, 但不存在明显的水力联系或者补给关系; 其周边其他水体都以典型的浅层水文循环特征为主, 且存在一定的旱季蒸发作用, 其中, 星云湖与渔村大河不仅具有相同的物质来源, 而且蒸发作用也比较类似, 可确认这2处水体不是渔村井的补给源。

关键词: 云南; 水化学; 地下水; 补给来源

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)04-0544-07

0 引言

地下水位作为流体学科重要的物理观测量, 是一个在多种影响因素作用下产出的复合参数, 既含有水位的宏观动态, 又包含微观动态(贾化周等, 1995; 车用太, 鱼金子, 2006; 刘耀炜等, 2010; 付虹等, 2014; 张立等, 2018)。一般情况下, 水位的微观动态主要是由构造活动所引起的, 而宏观动态变化主要与观测井周边地下水补给、径流和排泄状态密切相关。在日常研究过程中, 大气降水、周边大型水体等的影响最为普遍(车用太等, 1993; 晏锐, 2008; 孙小龙等, 2013; 胡小静等, 2016), 使得多数水位变化呈现出比较规律的雨季上升、旱季下降的年变形态。

前人通过水物理的研究方法, 开展了大量的关于地下水位异常提取和干扰变化排除等的研究, 其中包括利用卷积滤波法、组合水箱模型等对降水干扰的定量排除(王旭升等, 2010; 孙小龙等, 2013), 以及通过研究井孔含水层的介质参数等分析井孔所在区域的应力应变状态和水动力环境等(丁风和等, 2015; 孙小龙等, 2011; 魏建民等, 2017), 进行了有效的地震异常提取和干扰排除。有关研究表明, 地下水组分记录了流体的来源、

运移以及岩石圈内的重要信息, 在地下水循环过程中, 水化学成分和环境同位素作为水循环研究中的示踪剂, 在一定程度上记录着地下水运移、转化的历史, 为判定地下水类型、成因以及水岩反应程度等地球化学特征提供依据(Reddy, Naga-bhu shanam, 2011; 杜建国, 刘丛强, 2003; Song *et al*, 2006; 张磊等, 2014)。了解观测井孔的地下水补给来源, 对提高地震异常识别的准确性, 无疑是有帮助的。

云南江川渔村井自观测以来, 具有明显的年变形态, 研究该井水位年变形态究竟受控于哪些主要因素, 与周边的大型水体星云湖等是否有明显的水力联系等问题, 对认识和了解渔村井水位宏微观动态变化以及地震前兆异常识别都具有重要意义。本文主要利用水化学分析方法, 研究了渔村井的地下水循环状态与地表水以及大气降水的补给关系。

1 观测井及研究区域概况与采样

1.1 观测井及研究区概况

江川渔村动水位观测井位于江川县前卫镇渔村(24.33°N, 102.73°E), 井孔标高1 726 m, 周边活动断层主要发育有小江断裂和楚雄—建水断裂等,

^{*} 收稿日期: 2018-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金(U1602233)、云南省地震局科技人员传帮带培养任务(C3-201707)及2018年度震情跟踪定向工作任务(2018010301)联合资助.

♣通讯作者: 付虹(1963-), 研究员, 主要从事地震综合预测研究. E-mail: 280460086@qq.com.

该井地处小江断裂南段西支的次级断裂带附近（图1）。渔村井位于坝区内，地势平坦，四周为低山丘陵区，区域年降水量约为880 mm，距离井孔西北约20 m处有一条渔村大河，每年插秧季节（4月中旬至4月底）从上游水库放水至渔村大河，供周边秧田灌溉浇地，其余时间无放水，仅在河底有少许积水，干旱时节，大河处于干涸状态（本次取样时大河近乎干涸，仅有少许积水）；该井东约1.5 km处为星云湖，与抚仙湖仅一山之隔，水域总面积为34.71 km²，平均水深7 m，最大深度10 m，分布南北长约10.5 km，东西平均宽约3.8 km，湖岸线长36.3 km；石河水库位于渔村大河上游约5 km的石河村，该水库最大库容量为658万m³，控制容水量为475万m³，水深为22.8 m。本次研究对这些水体都进行了取样化验（图2）。

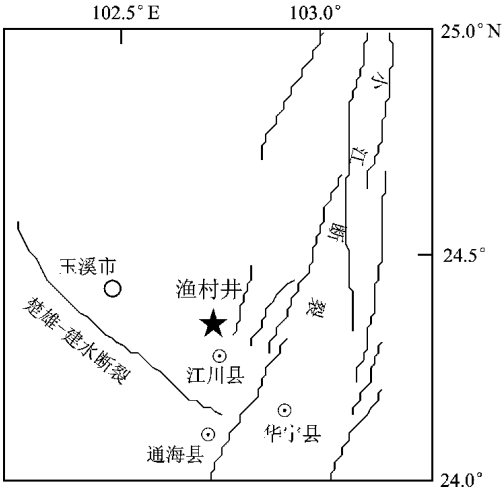


图1 渔村井周边地质构造图
Fig.1 Geological structure around the Yucun observation well

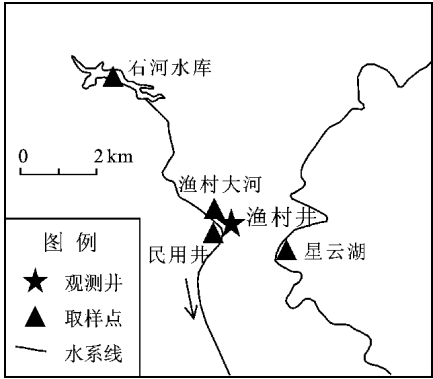


图2 渔村井周边取样点空间分布图
Fig.2 Spatail distribution of sampling points of Yucun observation well and its surrounding area

渔村井成井之初井深180 m，目前因淤泥堵塞，深约138 m，泄流口自流量为38 mL/s左右，套管深度约130 m，其中含水层处为花管（分别位于16.61~26.46 m，51.36~60 m，79.37~89.76 m以及99.61~111.35 m），其余部位均为钢管，井孔含水层为混层水，相对隔水层为第四系、第三系粘土，具体井孔柱状图见图3。

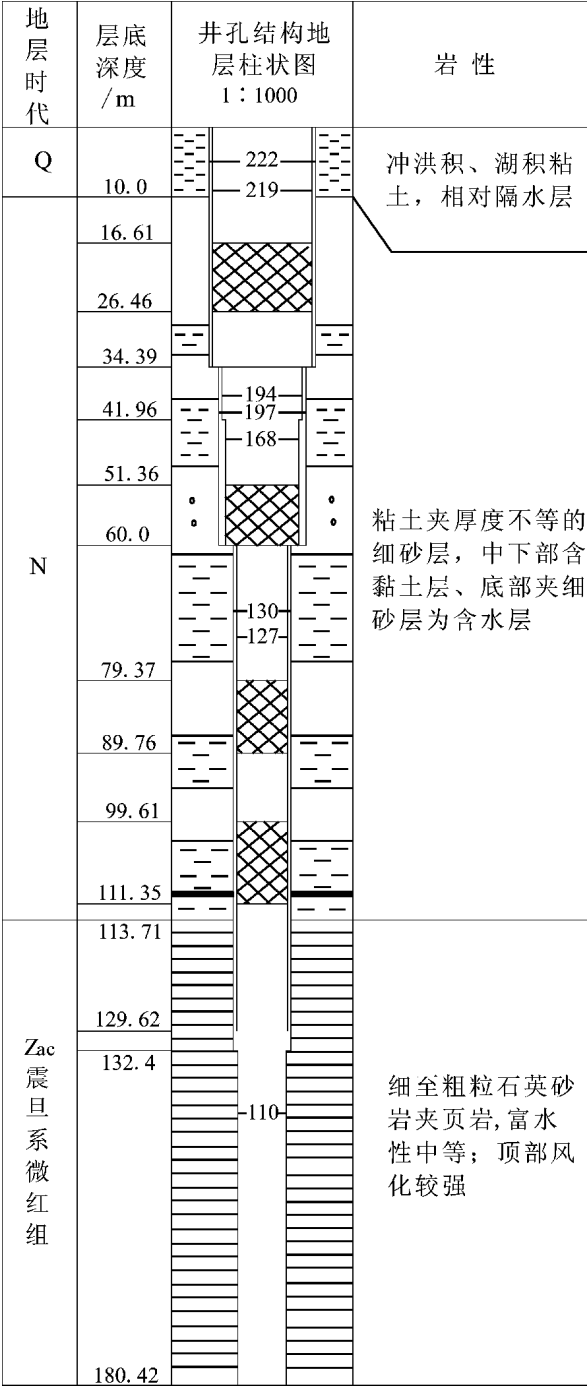


图3 渔村井井孔柱状图
Fig.3 Histogram of Yucun observation well

1.2 采样与测试

2017 年 3 月，对渔村井周边 5 km 范围内分布的水体进行详细调查，并对所调查的 4 处水体及渔村井共计 5 个研究对象进行了水样采集与测试，具体采样点分布见图 2。样品的水化学成分测试由云南省地震局昆明防震减灾技术实

验基地赵慈平研究员所负责的地下流体实验室测定，分析设备为 883 Basic IC plus 离子色谱仪；氢氧同位素测试由防灾科技学院廖欣副教授负责的地震地下流体重点实验室测定，测试设备为美国 LGR 激光液态水稳定同位素分析仪。测试结果见表 1。

表 1 渔村井周边水体水化学组分与同位素测试结果（单位：mg/L）

Tab. 1 Chemical composition and isotope of Yucun Well and its surrounding water (Unit: mg/L)

取样点	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	δD	δ ¹⁸ O
渔村井	430.61	14.94	22.09	2.55	135.69	0.050	65.063	795.81	-98.541	-13.663
星云湖	50.61	15.50	48.98	40.88	65.79	0.00	44.63	296.81	-40.101	-4.083
石河水库	15.69	12.63	19.57	4.83	8.87	0.021	13.69	115.05	-60.511	-7.527
渔村大河	55.94	18.72	47.18	37.05	68.74	0.027	28.071	305.66	-37.718	-3.851
民用井	64.66	48.70	117.27	20.88	73.31	0.009	81.38	336.30	-61.652	-8.290

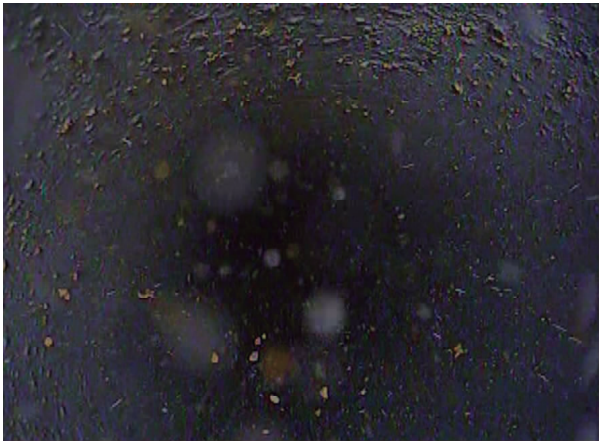
2 结果分析

2.1 井下电视探测结果

本次井孔结构探视是利用山西友源光电科技有限公司所生产的 YYGD-XZ 型井下电视，对整个井孔进行了全面探视。

井下电视结果显示，渔村井孔第一节钢管部分有大量的气泡上涌（图 4a），为目前云南地区开

展过井下电视探视的观测井中气泡最多的井；位于 16.61 ~ 26.46 m 处的第一节花管孔非常清晰，井壁没有任何附着物（图 4b）；第二、三节筛管已基本被覆满锈蚀物，基本无进水量；位于 100 m 处的第四节筛管有部分花孔外漏。井下电视探视结果表明，在渔村井井孔 16.61 ~ 26.46 m 处，井壁受外界水流动的冲刷非常显著，表明常年有大量的水从这一层位渗透，这些水的来源是本文探讨的重点。



(a) 井下第一节钢套管（0 ~ 16.61 m）



(b) 井下第一节花管（16.61 ~ 26.46 m）

图 4 渔村井井下电视探测结果

Fig. 4 The detection of underwater TV of Yucun observation well

2.2 水化学特征分析

水化学 Piper 图（又称三线图），是地下水水质类型、成因及来源分析的重要手段之一（Piper，

1953）。从图 5a 可见，所取的 5 个水样其水化学类型分别为 Na-HCO₃ 型（渔村井）；Ca-HCO₃ 型（民用井）；Mg·Ca-HCO₃ 型（渔村大河）；Ca·

Na-HCO₃ 型（石河水库）；Mg·Ca·Na-HCO₃ 型（星云湖）。以上类型均属于重碳酸型水，主要是由于补给水体进入地下后，在径流过程中溶解了土壤中的 CO₂ 造成的，代表了典型的大气降水与岩土之间的第一阶段反应，反映了浅层、年龄较轻的水文循环特征。但相比周边其它水体，渔村井中 Na⁺ 的相对含量明显偏高，而 Ca²⁺，Mg²⁺ 含量则远低于周边水体。根据离子之间的反应过程可知，当观测井中水体与含水层中的岩体之间发生深度接触时，水体中的 Ca²⁺，Mg²⁺ 会发生一系列的被吸附和交换过程，从而释放出更多的 Na⁺，使得含水层水体中 Ca²⁺，Mg²⁺ 含量明显减少，而 Na⁺ 含量则显著升高，表明井孔水体中阳离子交替吸附作用较强（孙

小龙等，2016）。由图 5a 可见，渔村井虽然属于浅层水，但其含水层水体与岩体之间存在一定的相互作用，其水岩作用较其他水样更为充分，而周边其他水体与岩体之间的相互作用非常弱，以典型的大气降水与岩石之间的第一阶段反应为主。

Na-K-Mg 三角图常用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样（Giggenbach, 1988）。从图 5b 可见，渔村井水样处在“部分平衡水”状态，表明观测井水体循环深度相对较深，存在一定的深部水-岩相互作用的成分；其余水样均处在“未成熟水区域”，且有部分水体非常接近 Mg²⁺ 端元附近，表明观测井周边水体的水-岩之间尚未达到离子平衡状态，溶解作用仍在进行。

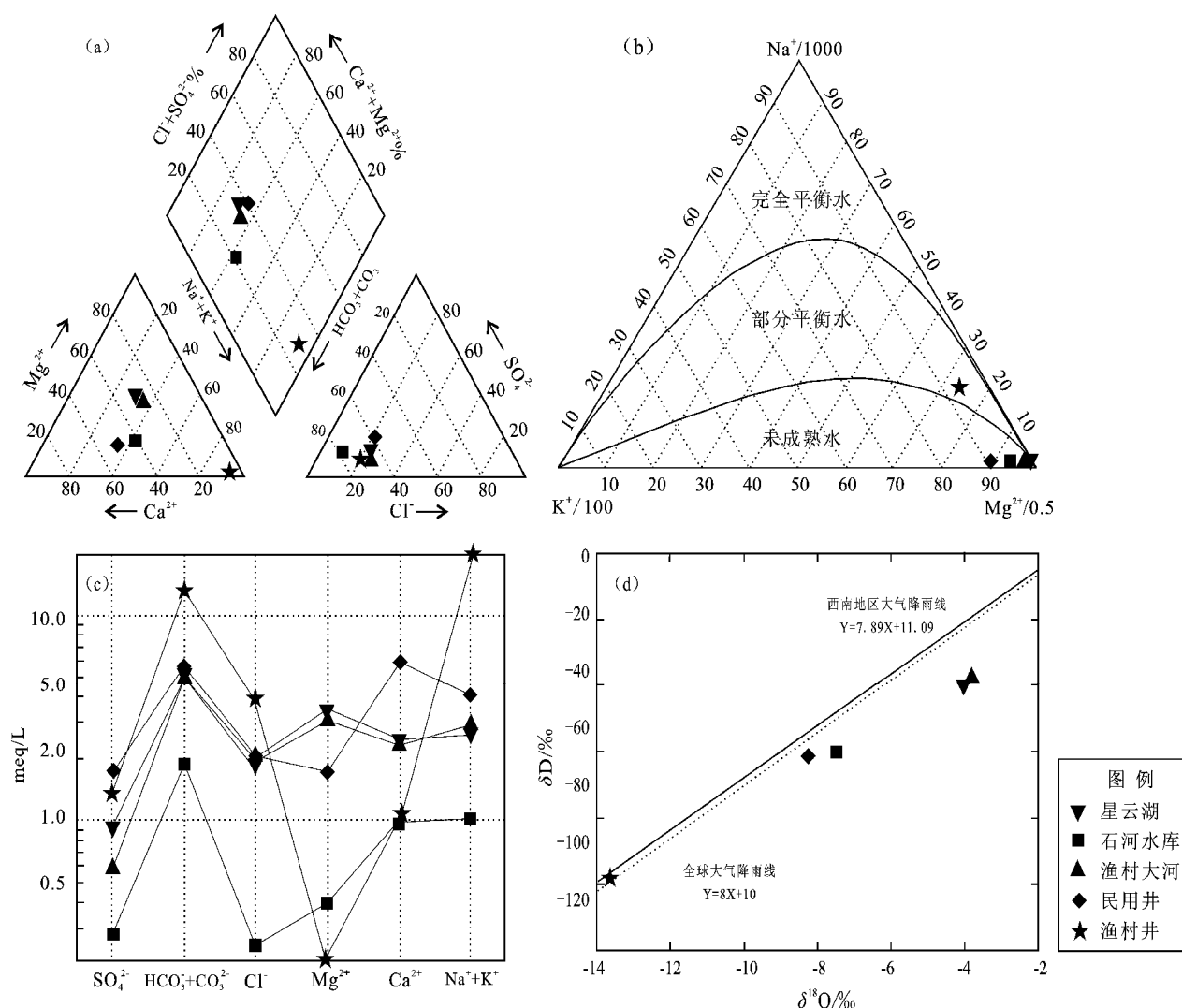


图 5 渔村井及其周边水体水化学 Piper 图 (a)、Na-K-Mg 三角图 (b)、Schoeller 图 (c)、氢氧同位素结果 (d)

Fig. 5 The diagrams of hydrochemical Piper (a), Na-K-Mg ternary (b), Schoeller (c) diagrams and oxygen isotopes (d) of Yucun observation well and its surrounding water

Schoeller 图通常用来表示不同水样的水化学组分随时间的变化规律以及各水样之间可能存在的关系 (陈昌亮, 2015)。5 个水样点的 Schoeller 图显示 (图 5c), 渔村井与其周边水体的离子成分相差较大, 表明该井与周边水体的物质来源不同, 不存在直接的水力联系, 根据图 5a 显示的结果, 这可能正是由于周边的补给水体进入地下后, 经历了较长时间的径流过程, 在整个渗透过程中发生了较强的阳离子交替吸附作用所产生的结果; 渔村大河与星云湖两个水样点的离子成分几乎一致, 表明二者的补给来源相同; 渔村井与距离其约 100 m 处的民用井离子成分相差很大, 表明二者并不在同一含水层; 距离渔村井约 5 km 处的石河水库与其离子成分也存在较大的差别, 表明二者亦无明显的水力联系。

2.3 氢氧同位素特征分析

氢氧同位素的组成记录了地下水起源和形成过程信息, 常用来识别地下水成因、迁移路径及其成分演化机制等 (顾慰祖, 2011; 张磊等, 2016)。氢氧同位素结果显示 (图 5d), 渔村井非常接近全球大气降雨线和西南地区大气降雨线, 表明该井孔目前的水源补给基本为大气降水; 其次是民用井, 也比较接近大气降水线; 而石河水库、渔村大河以及星云湖作为出露在地表的大型水体, 明显偏离于大气降水线右侧, 表现为正向漂移, 根据相关研究, 该现象很有可能与旱季时分地表水体的蒸发作用有关, 其中星云湖与渔村大河位置非常接近, 这可能表明二者的蒸发过程是比较类似的。

2.4 井水位变化与星云湖水面高程关系分析

对比 2005—2016 年星云湖水面高程和渔村井水位 (图 6a, b) 可见其趋势变化形态存在的一定的一致性, 但并不完全一致, 尤其是 2005—2006 年, 渔村井水位出现最低值, 同一时段星云湖水面高程并未出现相应的低值过程; 2009—2012 年, 星云湖水面出现明显的趋势性下降, 但渔村井水位趋势下降过程并不显著。对比星云湖水面高程与江川县降雨量 (图 6c) 发现, 二者的趋势形态几乎完全一致, 表明星云湖水面高程主要与当地降水量相关。根据文献记载, 星云湖周围有主要河流 16 条, 均为季节河, 河水主

要靠雨水补给, 这与实际观测情况比较吻合。上述结果表明, 渔村井水位与星云湖水面高程之间有一定联系, 但星云湖水面高程对渔村井水位的趋势影响并不明显, 二者之间较为一致的变化形态很有可能是由于它们均与当地的降水情况密切相关。

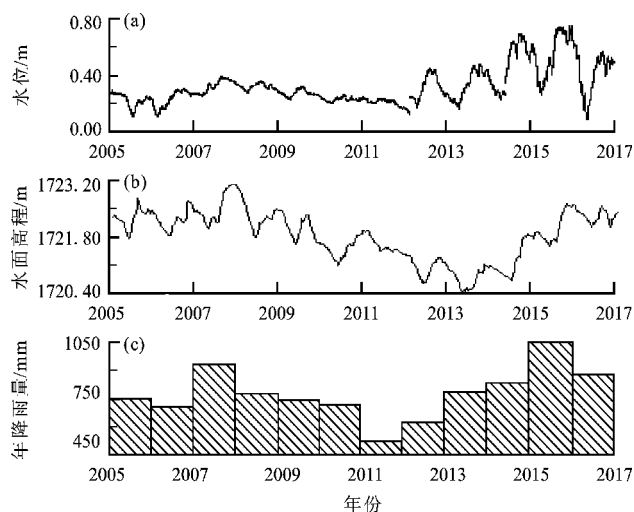


图6 渔村井水位 (a)、星云湖水面高程 (b) 及江川年降雨量 (c) 时序图

Fig. 6 Time series diagrams of water level in Yucun well (a), the water elevation of Xingyun Lake (b) and annual rainfall in Jiangchuan (c)

3 讨论

渔村井水位自 1996 年开始观测以来, 资料连续稳定, 年动态清晰, 至今已有 20 余年历史资料, 正常动态为雨季 (5—9 月) 上升、旱季 (当年 10 月至次年 4 月) 下降, 原始水位观测曲线与降雨量同轴曲线显示, 二者之间具有一定的相关性 (图 7), 笔者利用 Correl 函数计算 1990 年以来其年变形态与年降雨量之间的线性相关系数为 0.523。根据相关研究结果 (白宝荣, 付虹, 2006; 胡小静等, 2016), 对地下水位谷值变化逐年差值 (简称谷 - 谷值差) 与年降水量进行线性回归, 可拟合出二者之间的关系为: $Y = aX \pm b$, 其中 Y 为水位观测的谷值差, X 为年降水量。当水位谷值差超出拟合理论线一定范围时, 认为本年度水位变化与降水关系较小。

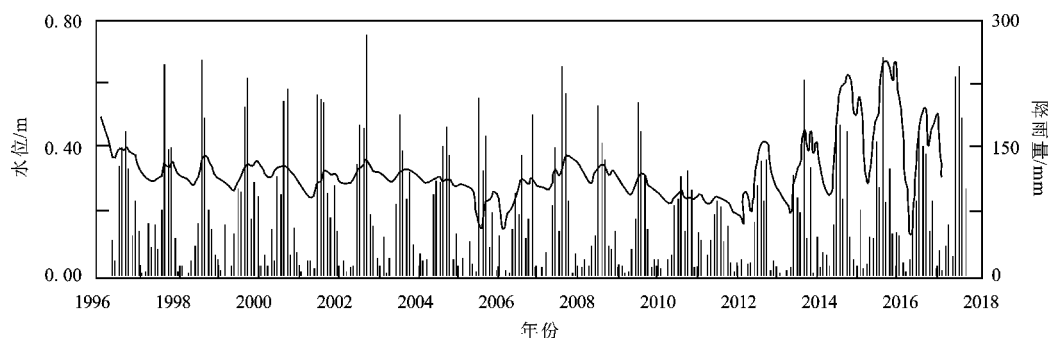


图7 渔村井水位与降雨量时间序列图

Fig. 7 Time series diagram of water level and rainfall in the Yucun well

从图8可见, 1996—2016年, 除2000年、2006年以及2013年以外, 其余年份水位变化均与降水影响范围相吻合, 未出现明显偏离降雨影响范围的情况。另外追溯渔村井水位出现异常之后中强地震的情况发现, 2000年出现异常之后, 2001年7月15日, 在江川发生了5.1级地震; 2006年出现异常之后, 2007年6月3日在距离渔村井约250 km处的宁洱发生了6.4级地震; 2013年出现异常之后, 在距离渔村井220 km处发生了景谷6.6级地震。结果表明, 渔村井水位变化动态出现明显偏离降雨影响范围之后, 次年该井附近可能有5级以上或其周边300 km范围内有6级以上地震发生。当水位与降水相关性减弱时, 有可能是因为构造活动增强所致, 而构造活动增强有利于地震的发生, 另一方面也说明, 渔村井水位具有反映构造活动的能力。

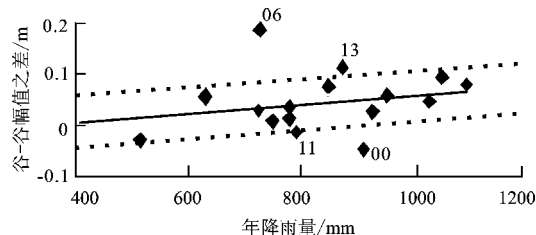


图8 年降雨量与渔村井水位谷 - 谷值差相关性示意图

Fig. 8 Correlation between annual rainfall and water level with the range of valley - valley value difference of Yucun well

从目前该井观测资料来看, 整个变化幅度仍处在降水影响的正常范围内, 虽然水化学特征分析结果显示渔村井水体中存在有深部物质作用的成分, 但不能以此判断它与深部构造活动有关。

4 结论

通过渔村井及其周边水体的水化学特征分析, 结合井下电视探视结果和观测井水位变化与星云湖水面高程关系的分析, 研究了渔村井的地下水循环状态与补给来源, 结合水位与降水的相关性分析讨论了渔村井水位反映构造活动的的能力, 得到如下认识:

(1) 井下电视探视结果表明渔村井在位于16.61 ~ 26.45 m处的含水层, 常年有大量的水渗透与井水发生交换, 其大量的气泡初步判断为水体与岩土作用产生的 CO_2 所致。

(2) 水化学分析结果表明, 渔村井的水源补给主要是大气降水, 井下电视显示16.63 m为水源补给主要处, 存在大量渗入的水, 主要是来自地表水, 但目前渔村井水体中的水岩反应过程以阳离子交替吸附作用为主, 存在一定的深部水岩相互作用, 且地下水循环深度较深, 因此认为目前渔村井所呈现的是雨水渗入与深部物质反应共同作用的结果。

(3) 渔村井水位趋势动态与其东侧约1.5 km处的星云湖水面高程之间有一定的相关性, 但水化学组分分析结果表明二者之间并不存在明显的水力联系或者补给关系, 因此认为这种相关性不是由于大气降水的直接补给导致的。

(4) 渔村井周边其他水体都以典型的浅层水文循环特征为主, 并且存在一定的旱季蒸发作用, 其中, 星云湖与渔村大河作为出露在地表的大型水体, 不仅具有相同的物质来源, 而且其蒸发作用也比较类似, 由于水化学成分及水岩作用过程与渔村井有显著的不同, 因此可以确认它们不是渔村井的补给源。

本文在水化学分析过程中,得到了中国地震台网中心周志华博士、晏锐博士,中国地震局地壳应力研究所孙小龙博士的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- 白宝荣,付虹. 2006. 排除降雨干扰后的地下水位异常与强震预报[J]. 地震研究, 29(1): 39-42.
- 车用太,鱼金子,张大维. 1993. 降雨对深井水位动态的影响[J]. 地震, 13(4): 8-15.
- 车用太,鱼金子. 2006. 地震地下流体力学[M]. 北京:气象出版社, 228-298.
- 陈昌亮. 2015. 长白山玄武岩区地热资源赋存规律及其水化学特征研究[D]. 长春:吉林大学.
- 丁风和,戴勇,宋慧英,等. 2015. 大甸子井-含水层系统水文地质参数间的变化关系[J]. 地震地质, 37(4): 982-990.
- 杜建国,刘丛强. 2003. 同位素地球化学在地震研究方面的作用[J]. 地震, 23(2): 99-107.
- 付虹,邬成栋,赵小艳,等. 2014. 云南开远井水位异常分析[J]. 地震学报, 36(2): 292-298.
- 顾慰祖. 2011. 同位素水文学[M]. 北京:科学出版社, 105-197.
- 胡小静,付虹,毕青. 2016. 基于年降水干扰排除的云南地区地下水位群体异常研究[J]. 地震研究, 39(4): 545-552.
- 贾化周,张炜,董守玉,等. 1995. 地震地下水手册[M]. 北京:地震出版社, 135-229.
- 刘耀炜,陆明勇,付虹,等. 2010. 地下流体动态信息提取与强震预测技术研究[M]. 北京:地震出版社, 39-40.
- 孙小龙,刘耀炜,晏锐. 2011. 利用水位资料反演华北地区构造应力场变化[J]. 地震, 31(2): 42-49.
- 孙小龙,刘耀炜,晏锐. 2013. 云南姚安井 2009 年 10 月后水位下降的成因分析[J]. 地震学报, 35(3): 410-420.
- 孙小龙,王广才,邵志刚,等. 2016. 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, 23(3): 140-150.
- 王旭升,王广才,董建楠. 2010. 断裂带地下水位的降雨动态模型及异常识别[J]. 地震学报, 32(5): 570-578.
- 魏建民,韩晓雷,李彬,等. 2017. 川滇地区数字化水位孔隙度和渗透系数时序特征分析[J]. 地震研究, 40(3): 449-457.
- 晏锐. 2008. 影响井水位变化的几种因素研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所, 23-46.
- 张磊,刘耀炜,孙小龙,等. 2014. 基于水化学和物理方法的井水位异常分析[J]. 地震地质, 36(2): 513-522.
- 张磊,刘耀炜,任宏微,等. 2016. 氢氧稳定同位素在地下水异常核实中的应用[J]. 地震地质, 38(3): 721-731.
- 张立,苏有锦,张磊,等. 2018. 曲江地震观测井水温变化的实验分析[J]. 地震研究, 41(2): 273-279.
- Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria; Derivation of Na-K-Mg-Cage indicators [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749-2765.
- Piper A M. 1953. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis [M]. Washington D C: United States Geological Survey.
- Reddy D, Nagabhushanam P. 2011. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India [J]. *Applied Geochemistry*, 26(5): 731-737.
- Song X F, Liu X F, Xia J, et al. 2006. A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River Basin [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 49(12): 1299-1310.

Analysis on the Recharge Sources of Groundwater in Jiangchuan Yucun Well, Yunnan

HU Xiaojing¹, FU Hong¹, LI Libo¹, LI Xiang²

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Earthquake Administration of Jiangchuan County, Yuxi 652600, Yunnan, China)

Abstract

Based on the analysis of hydro-geochemical characteristics and combined with the exploration result by underground-TV and correlation analysis of regional groundwater, we investigated the groundwater circulation condition and recharge sources in the Yucun well. The results show that, the recharge sources of groundwater in the Yucun well were mainly from atmospheric precipitation. There existed water-rock interaction components in the composition of water quality of the Yucun well, and the circulation depth of groundwater was deep. Therefore, the current composition of water quality of the Yucun well reveals the result of infiltration of surface rainwater and the interaction of deep water-rock. There was a certain correlation between the Yucun well and the surface elevation of the Xingyun Lake about 1.5 km to its east, however, there was no obvious hydraulic connection or supply relationship. The other water surrounding the Yucun well was mainly characterized by typical shallow hydrological circulation and had some evaporation in dry season. The Xingyun Lake and the Yucun River were not only showing same material sources, but also showing similar evaporation effects. So, it is confirmed that the two water bodies are not the supplement source of the fishing village well.

Keywords: Yunnan; hydro-geochemistry; groundwater; recharge source