

滇东南峰林湖盆区表层岩溶泉水化学动态变化分析^{*1}

尹继清 范弢* 晏朋

(云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500)

【摘要】：为探究不同表层岩溶带岩溶水系统和人类干扰方式下滇东南峰林湖盆区表层岩溶泉地球化学变化特征及其影响因素，利用CTDP300水质检测仪，对不同地质背景下的两泉域的水化学性质从月动态和降雨动态两个尺度进行了一个水文年的观测。结果表明：(1)菜花箐泉理化指标季节动态变幅较大：水温为4.6℃，电导率为302 μs/cm，pH为0.66，水浊度为255.1；火把洞泉变幅相对较小：水温为3.3℃，电导率为225 μs/cm，pH为0.5，水浊度9.8。(2)无雨时：菜花箐泉气温与水温、电导率、pH呈正相关关系；火把洞气温与水温呈现正相关关系，水温与电导率、pH呈现负相关关系。(3)强降雨时：菜花箐泉在降雨初期水温、电导率、水浊度均出现峰值，pH呈现低值。在降雨中后期，电导率大幅度上升，在6 h内从189 μs/cm上升到405 μs/cm，pH出现峰值后呈波动下降趋势。火把洞泉在降雨初期水温与电导率、pH呈正相关关系，各自呈现本期间峰值。在降雨持续10 h后，pH、电导率均呈现下降趋势。(4)弱降雨气候条件下：菜花箐和火把洞泉的理化指标变幅都较小，在降雨初期、中期和后期两泉域pH、电导率都出现稀释效应曲线。

【关键词】：表层岩溶带；滇东南峰林湖盆区；表层岩溶泉；水化学

【中图分类号】：K903/X832 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004-8227(2017)05-0747-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201705012

表层岩溶带是由于强烈的岩溶化过程，在表层碳酸盐岩形成各种犬牙交错的岩溶个体形态和微形态并组合构成不规则带状的强岩溶化层^[1]。表层岩溶带不但对岩溶地下水系统具有调蓄作用，还可形成表层岩溶泉^[2]。岩溶地下水是岩溶区人类赖以生存的重要水源供给地，由于其特殊的水文地质条件，使得它极易受到植被、土壤、枯落物、气候、人类等外界环境的影响。表层岩溶泉水文地球化学特征能够反映各种外界因素对地下水系统的影响，是水文地质及水文地球化学研究的主要内容。近年来，学者们分别从单个特殊时间尺度，对典型岩溶地下水化学指标的动态变化，及其对环境敏感性的反应等进行了较为全面的研究^[3~6]。而表层泉地球化学特性对环境变化极为敏感，存在明显的季节变化规律。同时，表层岩溶泉水化学组分正受到土地利用形式、人类活动等的影响。如土被覆被较好对岩溶泉水化学的调蓄作用较强^[7]，人类活动可致使岩溶区地下水水质的恶化^[8]。本研究于滇东南普者黑峰林湖盆区选取植被恢复程度和人类干扰强度不同的菜花箐泉和火把洞泉，从月动态、降雨动态两个尺度，

¹ 收稿日期：2016-10-14；修回日期：2017-01-03

基金项目：国家自然科学基金地区项目“滇东岩溶高原峰林湖盆水源枯竭机制研究”(41261007) [National Natural Science Foundation “Study on the Mechanism of Water Exhaustion of Peak Forest - Lake Basin in the East of Yunnan Karst Plateau” (41261007)]; 国家自然科学基金地区项目“滇东岩溶高原云南松水源林产水功能恢复机理研究”(41661004) [National Natural Science Foundation “Study on the Restoration Mechanism of Water - Production Function of Pinus Yunnanensis Water-Source Forest In The East Of Yunnan Karst Plateau” (41661004)]

作者简介：尹继清(1993~)，女，硕士研究生，主要从事岩溶生态水文过程研究。E-mail: 852989895@qq.com

***通讯作者** E-mail: fantaojx@163.com

对比不同土地覆被岩溶泉水的水化学动态变化特征，综合分析影响其变化的气候因素、人为因素。以期掌握岩溶地下河水化学的变化规律，为研究区因地制宜地开发利用和保护水资源，合理控制旅游环境容量，及优化配置人工植被群落，增强对水源林地的保护具有重要的理论意义。

1 研究区概况

研究区位于滇东南普者黑峰林湖盆区(103° 34′ ~104° 45′ E、23° 45′ ~24° 28′ N)，海拔1 440~1 900 m，面积约165 km²。区内断陷盆地是滇东高原独特的蓄水型峰丛(林)湖盆的典型发育区，植被-土壤层-表层岩溶带-包气带-饱水带构成了地表地下双层岩溶垂直含水结构系统^[9]。湖盆西部有暗河和地下水补给，内部有地表河流自北向东南流出，沿途有孔隙水、溶洞水补给，具有独特的水文地质结构^[10]。该区属中亚热带高原季风气候，年平均气温16℃，雨量充沛，多年平均降雨量1 214.8 mm(图1)。近年来，受人为活动影响，普者黑盆地地带性、半湿性亚热带常绿阔叶林已被破坏殆尽，退化迹地上只剩残存的常绿阔叶次生林、低矮的次生石灰岩灌丛，以及1980s以来人工种植的云南松纯林，目前研究区植被覆被主要由自然恢复和人工恢复的植被群落构成。土壤以红壤、黄壤、水稻土为主，有极少数黑土，土被分布不连续。本文于研究区选取两种不同表层带岩溶水系统构架下的泉域布设野外监测点：菜花箐泉(104° 6′ 11″ E，24° 7′ 52″ N)、火把洞泉(104° 8′ 10″ E，24° 9′ 40″ N)。菜花箐泉上覆次生林；邻近居民生活区；枯落物含量较少；土壤层较薄；基岩裸露率高达87%。火把洞泉位于旅游景区，旅游旺季受人类干扰强度大；枯落物、土层较厚；基岩裸露率为58%；植被覆盖率高于菜花箐泉。泉域基本概况(表1)。

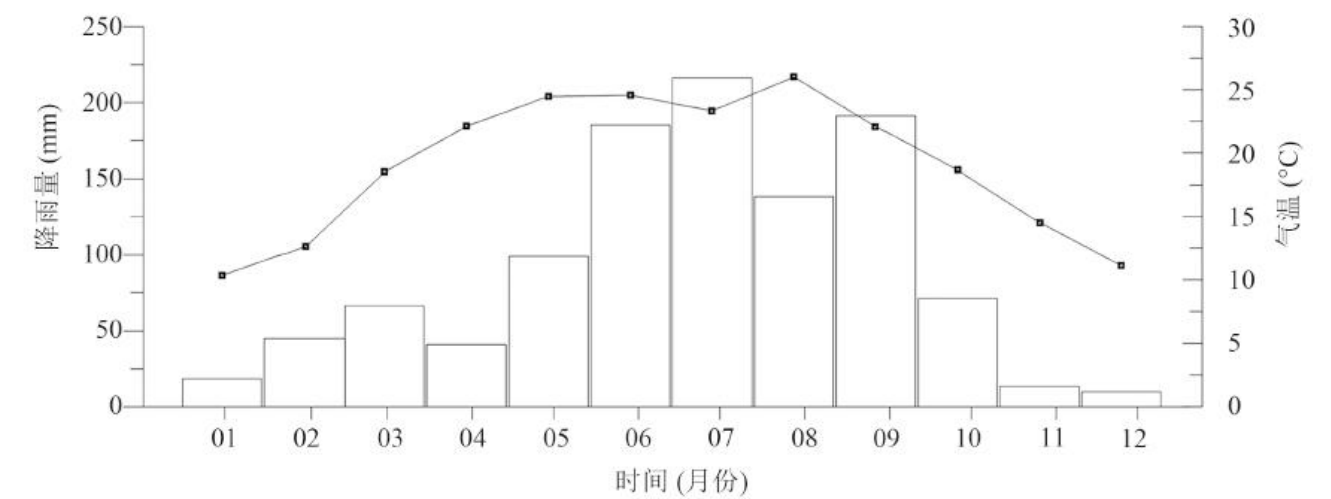


图1 普者黑降雨量—气温的季节变化

Fig.1 Seasonal Changes of Precipitation-temperature of Puzhehei

表1 监测泉域基本情况

Tab.1 Basic Conditions of Springs

名称	植被(优势树种)	土壤类型	土壤厚度(cm)	基岩裸露率(%)	枯落物厚度(cm)	枯落物存量(T/hm ²)
菜花箐泉	清香木, 锥连栎, 滇青冈, 高山榕	灰棕色石灰土	0~80	87	0.8	0.6
火把洞泉	香樟, 老虎刺, 小叶羊蹄甲, 清香木	暗棕色石灰土	0~110	58	3.0	10.2

2 研究方法

采用澳大利亚 Greenspan 公司生产的 CTP300 水质监测仪器,自动记录 2014 年 12 月~2015 年 12 月泉水的降雨量、水温(T)、pH 值、电导率(EC)、水浊度,它们的精度分别达到: T 0.01 °C, pH 0.01, EC 0.1 μ S/cm。每隔 15 min 采集一次数据。

用 Excel 处理原始数据,并用 Grapher9 软件作图分析各项指标的变化趋势。泉域的各项物理、化学指标的季节变化由于受到地带内局部因子影响较大,故本文采用各项指标的月平均值计算。日动态变化去掉两个极端最大和最小值,取每小时的平均值计算。

3 结果与分析

3.1 泉水物理化学指标的季节变化特征

不同泉域的水温、电导率、pH、浊度的季节变化曲线(图 2)。水温随着气温的升高而逐渐升高,反之亦然。两泉水水温均 1 月降到最低值,但菜花箐泉的季节变化幅度大于火把洞泉,菜花箐泉年温差为 4.6 °C,火把洞泉为 3.3 °C。因为菜花箐泉为石质界面,土壤为沙壤土,升温快降温快,故水温变幅较大。火把洞泉植被覆盖率较高,枯落物层较厚,为土石质界面。植被对小生境有很好的调节作用,夏天的降温作用冬天的保温作用使其水温变幅小。这与邓新辉等^[11]人对广西弄拉岩溶植被的表层水文地球效应研究,植被能改变土壤的理化性质,增强对脆弱的岩溶生态系统的调蓄作用结果相一致。

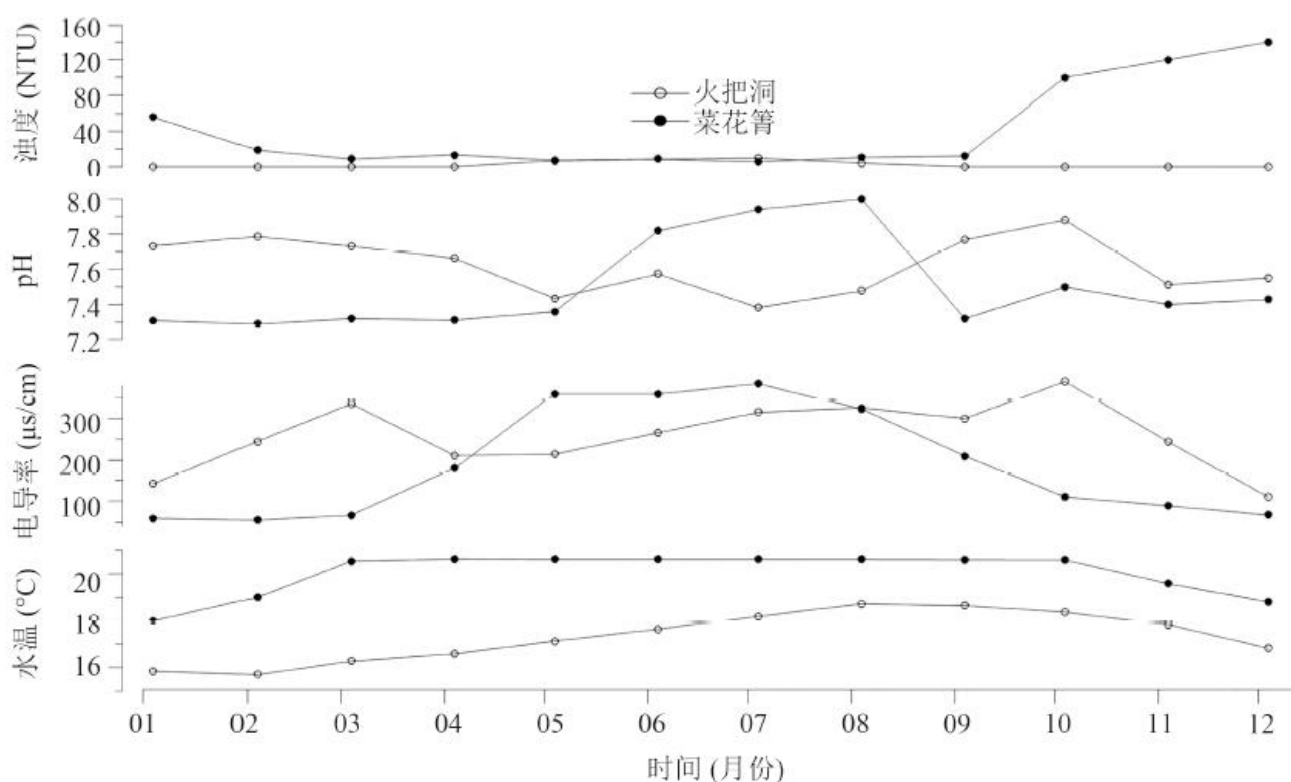


图 2 菜花箐泉和火把洞泉物理化学性质的季节变化

Fig.2 Seasonal Variation of Physical-chemical of Caihuaqing and Huobadong

菜花箐泉电导率变幅大于火把洞泉(图 2),菜花箐泉 1 月出现最低值 58 μ S/cm,3~5 月增幅较大,7 月达到最高值 360.1 μ S/cm;火把洞泉 12 月出现最低值 110 μ S/cm,2、3 月增速较快,3 月达到最高值 335 μ S/cm。由于菜花箐泉邻近居民生活区、

农耕区,生产生活用水量大,人为大量抽取地下水,春、夏季正值作物生长时节,农业肥料的输入增加了离子的来源,因而5月电导率出现峰值。其最高值高于火把洞泉,泉水电导率的高低与人为干扰程度成正比关系,这与沈利娜等^[12]人对弄拉兰电堂泉的研究结果一致。火把洞泉由于土被较好,2、3月降水量增多(图1),岩溶作用速率加快,泉水的离子数量增多,因而3月电导率达到最高值^[13]。随着夏季降雨量大,稀释效应明显,加之植被-枯落物-土壤-表层岩溶带岩溶水系统结构的调蓄作用,电导率呈现波动稳定状态。

菜花箐泉的pH变幅较大,春、冬季达到最低值,夏、秋季达到最高值。火把洞泉则夏季达到最低值,冬季达到最高值(图2)。菜花箐泉夏季正值农作物生长的季节,大量的施用农药化肥,由于土层较薄,加之夏季降雨量较多,土壤冲刷严重,农药随着雨水进入表层岩溶泉,大量碱性离子中和酸性离子,因而出现夏秋季节pH较高。章程等^[14]人对重庆金佛山国家级自然保护区垂直气候带岩溶动力系统特征的研究表明,土壤中生物活动性的强弱会影响土壤CO₂含量。火把洞泉水的pH值正好与水温呈现负相关关系。随着气温的升高,生物活性增强,分泌出更多的有机酸,土壤CO₂含量增加,降水增多,泉水的pH降低。随着温度的降低,土壤中生物活动减弱,分泌出的有机酸含量减少,同时土壤的CO₂含量也随之减少,CO₂↑+H₂O→H⁺+HCO₃⁻反应生成的H⁺减少,pH降低^[15]。

菜花箐泉冬、春季节浊度较高,12月达到最高值260.6,夏季较低,7月达到最低值5.5。火把洞泉夏秋季节水浊度较高,冬、春季节水浊度较低,9月达到最高9.8,1~4月、11~12月浊度均为0(图2)。水中含有的泥沙、粘土、有机物、无机物、生物、微生物悬浮体会对水的NTU造成影响^[16]。地表植被-土壤系统的改变能直接影响到表层岩溶水的变化情况。菜花箐泉域冬春季节需水量大,人为大量抽取地下水,部分村民直接于泉口位置清洗衣物、蔬菜等;加之冬季气候温和,气温较高,不易分解的重金属元素和污染物析出增大了泉水浊度。夏季随着降雨量的增大附着在土壤胶体的大量金属元素进入水体,6~9月降雨量最大(图1),因此在夏季稀释效应占主导,故而浊度相对较低。火把洞泉植被覆被较好,夏季高温多雨的气候条件使岩溶作用增强,植被-土壤系统是岩溶地下水的天然屏障,它可对地下水的污染物质进行阻隔、过滤和净化的作用,因而泉域浊度的季节变幅仅为9.8。夏季微生物活动增强,微生物悬浮量增大,水中有机物质增加,随着雨水残存在土壤表层的污染物质沿着表层岩溶带裂隙进入表层岩溶水系统,夏季降雨量大,以淋溶作用为主,故水浊度增大^[16]。加之,火把洞为旅游景区,夏季为旅游旺季,人流量大,不文明的旅游活动污染水源,使得夏、秋季节水浊度达到最大值^[17]。

3.2 无降雨条件下泉水物理化学指标的变化动态

无雨时,菜花箐泉的水温、电导率、pH与气温呈正相关关系(图3)。但是其水浊度动态变化与水温、电导率、pH、气温无明显的相关关系。在2月2日7:00、14:00水浊度各出现一次峰值分别为:165.5、245.2。在这两次峰值之前均出现浊度的小幅度波动,6:00为23.5,13:00为21.2。由于白天气温高,生物活性增强,表层岩溶带CO₂含量增多,岩溶作用强度加大,其方程式为CO₂+H₂O=H⁺+HCO₃⁻,HCO₃⁻+CaCO₃=Ca²⁺+2HCO₃⁻;水中Ca²⁺等离子含量增多,电导率升高,H⁺含量减少,pH升高。说明水温控制着pH、电导率的变化^[11]。浊度变化是由于该泉域地下水为当地居民生产生活用水水源供给地,两次峰值一个出现于清晨,一个出现于中午,是由于居民抽取地下水导致浊度突然增大。

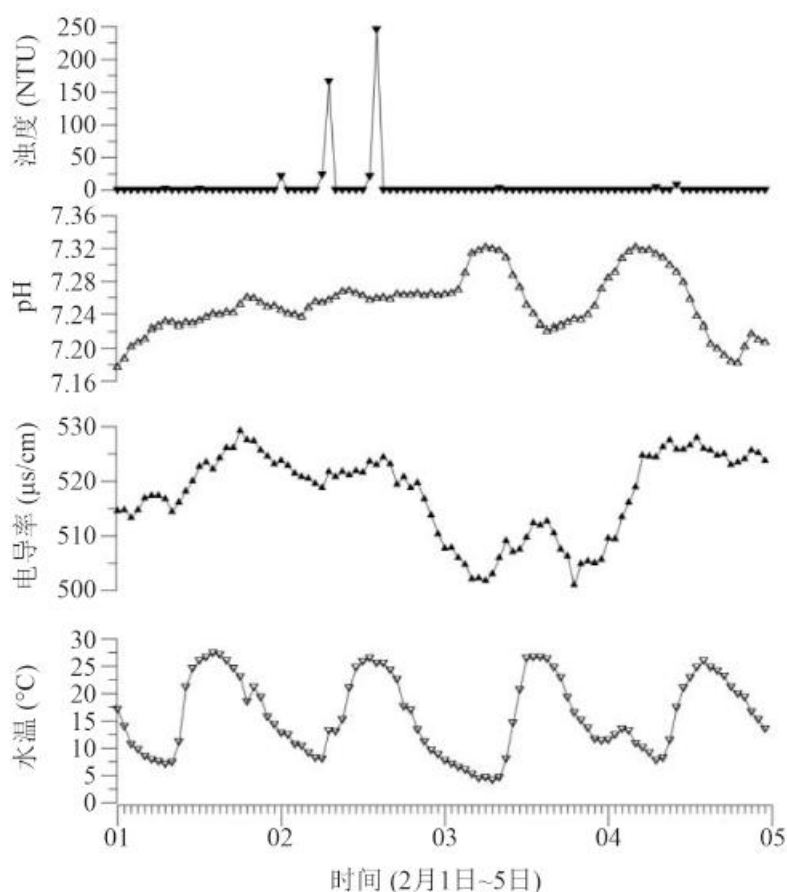


图3 无雨时菜花箐泉水化学动态变化

Fig.3 Variation of Physical-chemical of Caihuaqing Spring Without Rainfall

火把洞水温与气温呈现正相关关系，白天水温随气温的升高而升高，但是水温峰值滞后于气温 1~2 h，夜间水温随气温降低而降低，呈现阶梯式波动下降(图 4)。电导率出现的峰值均超前于水温，2 日 16:00 出现电导率峰值 2 285.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，1 日 4:00 次峰值 1 720.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ；在 2 日 2:00 水温为最低值 15.5 $^{\circ}\text{C}$ 时 pH 达到最大值 7.8。水浊度很低，最大值为 0.15。这种变化趋势可能与其泉域上覆枯落物层有关，枯落物层对泉水的物理、化学变化有较好的调蓄作用^[18]。水温与电导率呈现负相关关系，由于夜间植物呼吸作用和植被枯落物层释放出大量 CO_2 促进岩溶作用正向进行，各离子浓度增加，电导率增大。

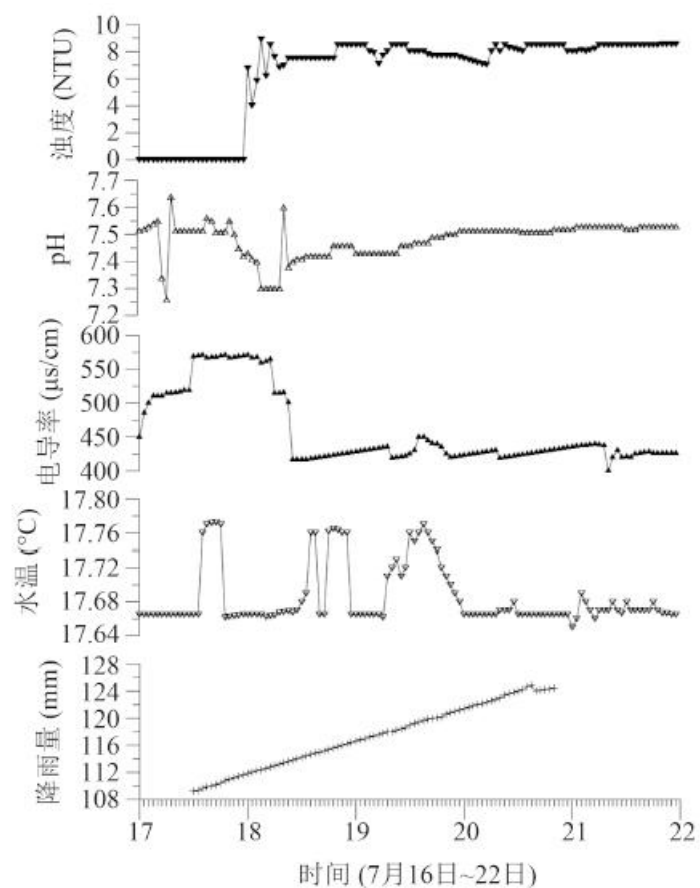


图 4 无雨时火把洞泉水化学动态变化

Fig.4 Variation of Physical-chemical of Hubadong Spring Without Rainfall

3.3 强降雨气候条件下泉水物理化学指标的变化动态

菜花箐泉和火把洞泉在强降雨条件下物理、化学指标的昼夜动态监测结果曲线图(图 5、6)，在观测期间内 17 日开始出现高强度降雨，持续时间较长约 3 天零 9 小时，累计降雨量达 109.2 mm。

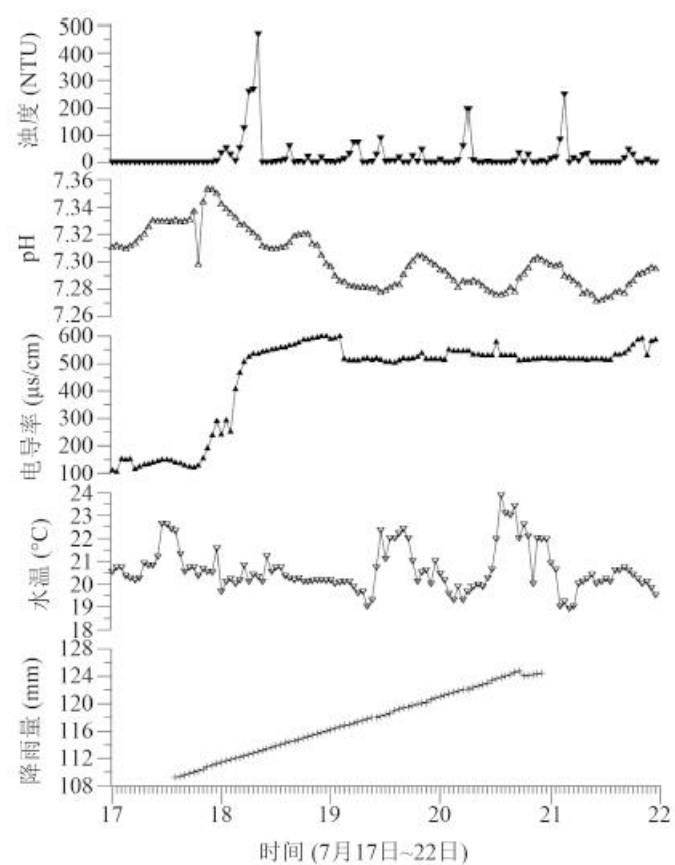


图 5 强降雨时菜花箐泉水化学动态变化

Fig.5 Variation of Physical-chemical of Caihuaqing Spring During the Rainstorm

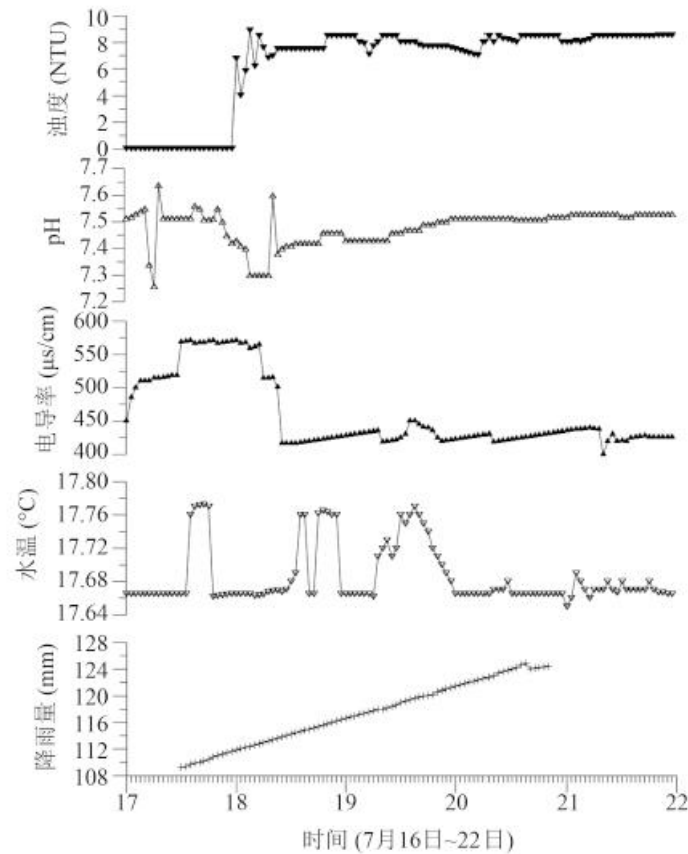


图 6 强降雨时火把洞泉水化学动态变化

Fig.6 Variation of Physical-chemical of Hubadong Spring During the Rainstorm

菜花箐泉水温在降雨初期、中期、后期出现 3 个峰值(图 5)。分别为: 21.6 °C、22.3 °C、23.9 °C, 波动变幅较大约 3.5 °C; 电导率在降雨开始 6 h 内从 189 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 上升到 405 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 在降雨中期出现最大峰值 598 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 随即保持稳定趋势; pH 在降雨初期出现最小值 7.29, 3 h 后出现峰值 7.35, 而后呈波动下降趋势; 浊度在降雨初期出现峰值 467.2, 在降雨中后期出现两个次峰值分别为 195.4、248.2。菜花箐泉域在降雨初期电导率、水浊度出现峰值是由于泉域人为干扰强度较大。泉域靠近居民区和耕地区, 生活废水和大量施用农家肥, 加之其上枯落物几近被居民带走, 枯落物层的明显减少, 增加了降雨对土壤的直接作用, 雨滴和径流对地表的冲击、分散、悬浮、运移能力的增强、加速了土壤的侵蚀速率, 造成了土壤颗粒和可溶性物质的大量迁移^[16, 19], 沿着岩溶裂隙、下水洞、管道进入补给地下水, 原有在裂隙中的“老水”被冲到水体里, 岩溶裂隙中的物质会伴随雨水向下部的溶洞、地下河搬运。以至前期的活塞效应和污染物的淋虑作用使得水体电导率、水浊度出现峰值。在降雨后期, 由于雨水的稀释效应开始显现, 水浊度, 电导率降低, 波动变幅较小。pH 降雨初期降低是由于泉域上覆的次森林层乔木生长较好, 大气降雨经过穿透雨、树干径流、石质界面进入岩溶水系统。植物有酸化雨水的功效, 降低大气降雨的 pH 值^[11]。

火把洞泉在降雨初期, 各自呈现本期间峰值, 水温 17.76 °C、电导率 571 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、pH 7.6; 在降雨持续 10 h 后, pH、电导率均呈现下降趋势; pH 在峰值出现前期约 1 h 出现最低值(图 6)。由于降雨初期 CO_2 效应明显, 降雨溶解的 CO_2 、植被枯落物层释放出大量 CO_2 、使得土壤 CO_2 含量增多, 表层岩溶带溶解了大量的土壤 CO_2 , 岩溶作用强度加大, 其方程式为 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$, $\text{HCO}_3^- + \text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$, H^+ 含量减少, pH 升高, 阳离子浓度增大, 电导率增强; 该区土壤层、枯落物层较厚, 降雨补给形式以分散面状渗流为主, 导致 CO_2 效应曲线出现^[20]。电导率的下降是由于降雨后土层和表层含水带达到饱和, 降雨稀释作用开始显现。由于在无降雨条件下管道水溶解无机、有机 CO_2 多, 导致 pH 在降雨初期出现极低值。pH、电导率、水温在降雨持续一段时

间过后变幅趋于稳定，这可能是由于其上有枯落物层覆盖，岩溶生态环境调蓄作用较强^[20]。水浊度在降雨后约 10 h 浊度由 0 上升到 8.5，达到高值后便居高不下，没有与降雨出现同步关系，这可能与火把洞泉为旅游景点区，夏季正值旅游旺季，人流量增大，加大了人为干扰强度，导致其水浊度较高。这与于正良等^[17]人基于 PCA 和在线监测技术研究旅游活动对岩溶地下水的影响，得出旅游活动高峰期较多的人流量会对泉水的离子变化情况有明显影响，使得电导率和水浊度增大。

3.4 弱降雨气候条件下泉水物理化学指标的变化动态

菜花箐泉和火把洞泉在弱降雨条件下物理化学指标的昼夜动态监测结果曲线图(图 7、图 8)，在观测期间内 8 日开始出现降雨，持续时间较长约 21 h，累计降雨量达 11 mm。

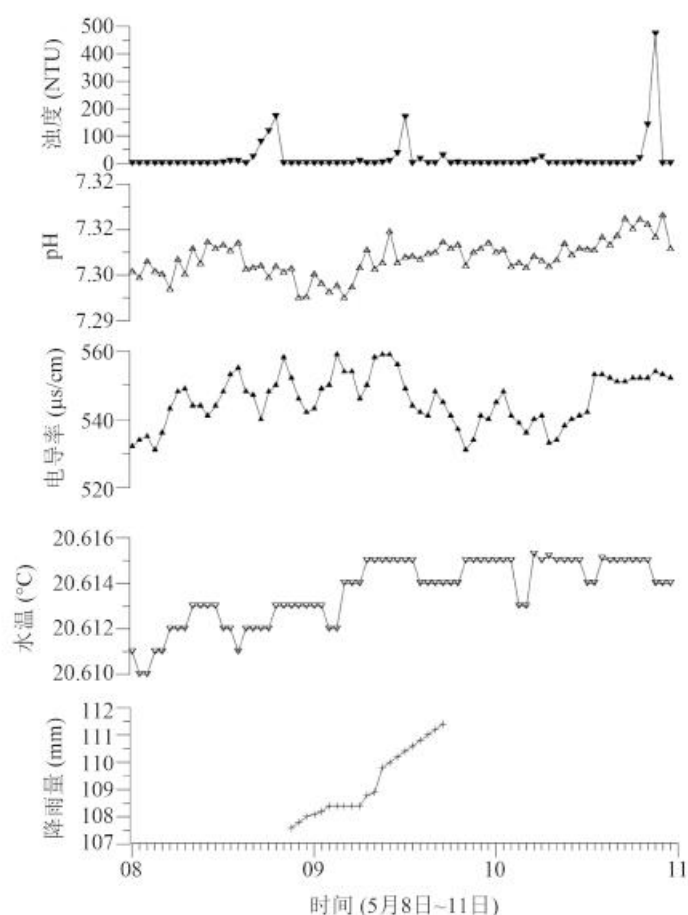


图 7 弱降雨时菜花箐泉水化学动态变化

Fig.7 Variation of Physical-chemical of Caihuaqing Spring During the Light Rainfall

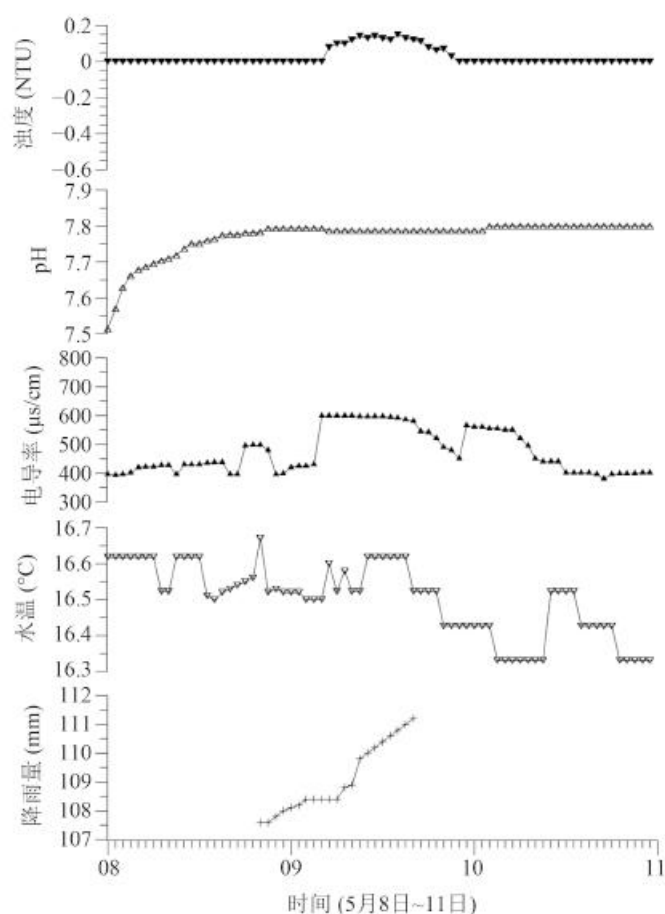


图 8 弱降雨时火把洞泉水化学动态变化

Fig.8 Variation of Physical-chemical of Hubadong Spring
During the Light Rainfall

在弱降雨条件下, 菜花箐和火把洞泉的各项物理化学指标的变幅都较小, 在降雨初期、中期和后期两泉 pH、电导率都出现稀释效应曲线, pH 升高, 电导率降低(图 7、图 8)。但是菜花箐出现稀释效应的时间为初期就开始显现, 而火把洞泉则出现于降雨中后期。这可能与岩溶水系统结构有关^[21], 火把洞泉水浊度变幅较小, 但是菜花箐泉, 在降雨期间, 出现三个峰值, 分别为 8 日 18 h 170, 9 日 12 h 169, 10 日 21 h 473。该变化与降水无明显相关性, 这可能与人为的抽取地下水有关。

4 结论

(1) 人为干扰强烈, 植被-土壤-表层岩溶带岩溶水系统结构下的菜花箐泉物理、化学指标季节动态变幅大, 各项理化指标的年最高值均较火把洞泉高。无雨时水温、水浊度较火把洞泉高, 并且变幅较大, 其水温控制着 pH、电导率的变化。强降雨时降雨初期以活塞流效应、污染物淋溶作用为主导, 在降雨后期稀释作用开始起作用。弱降雨时表现为稀释效应。表明该泉域对环境变化的敏感性较强, 植被-土壤-表层岩溶带岩溶水系统结构对岩溶泉的调蓄作用较弱。

人为干扰强度较小, 植被-枯落物-土壤-表层岩溶带岩溶水系统结构下的火把洞泉域物理、化学指标季节动态变幅相对较小。泉域水温、水浊度年最低值较菜花箐泉低, 电导率、pH 年最低值较菜花箐泉高。无雨时电导率、pH 较菜花箐高, 且变幅很小, 水温滞后于气温峰值 1~2 h。强降雨时, 降雨初期 CO₂ 效应显著, 在降雨后期以稀释作用为主。弱降雨时, 表现为稀释效应。说

明该泉域对环境变化的敏感性较弱，植被-枯落物-土壤-表层岩溶带岩溶水系统结构对岩溶泉的调蓄作用较强。

(2)综上所述植被覆被较好、枯落物层较厚的泉域理化性质对环境变化的敏感性较弱，植被-枯落物-土壤-表层岩溶带岩溶水系统结构对岩溶泉的调蓄作用较强。滇东南普者黑峰林湖盆区土壤侵蚀、土壤退化严重，区域生态环境不断恶化，生态服务功能下降。近年来，政府和地方高度重视喀斯特退化生态系统的植被重建。因此，在该区石漠化生态重建和恢复的过程中，合理控制旅游人口；退耕还林，优化配置人工植被群落，大力保护落叶阔叶林林地枯落物是较为稳健的措施，这同时对表层岩溶泉的涵养和发育具有重要的意义。

参考文献:

[1] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 等. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J]. 中国岩溶, 2001, 20(2): 106 - 110.

【JIANG Z C, WANG R J, PEI J G, et al. Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(2): 106 - 110.】

[2] 苏春田, 潘晓东, 唐建生, 等. 环境对湘西洛塔表层岩溶泉水文地球化学特征的影响[J]. 山地学报, 2014, 32(2): 205 - 211.

【SU C T, PAN X D, TANG J S, et al. Influence of eco-environment on hydrogeochemical of epikarst springs in Luota, West Hunan Province of China[J]. Mountain Research, 2014, 32(2): 205 - 211.】

[3] HESS J W, WHITE W B. Storm response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky[J]. Journal of Hydrology, 1988, 99(3/4): 235 - 252.

[4] YANG P H, YUAN D X, YUAN W H, et al. Formations of groundwater hydrogeochemistry in a karst system during storm events as revealed by PCA[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(14):1412 - 1422.

[5] 徐尚全, 杨平恒, 殷建军, 等. 重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 77 - 83.

【XU S Q, YANG P H, YIN J J, et al. Research on the sensitivity of geochemical of underground river in Chongqing Xueyu cave[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 77 - 83.】

[6] 曾 成, 刘再华, 赵 敏, 等. 基于谱分析的岩溶地下河系统短时间尺度水化学变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3): 39 - 44.

【ZENG C, LIU Z H, ZHAO M, et al. A study of short-time scale variation in hydrochemistry of karst ground river based on spectrum analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(3):39 - 44.】

[7] 贾亚男. 西南典型岩溶地区土地利用与土地覆被变化对岩溶水质的影响[D]. 重庆: 西南师范大学博士学位论文, 2004.

【JIA Y N. The effects of land use and land cover changes on karst water quality in three typical karst regions,

Southwestern China[D].Chongqing: Doctor Dissertation of Southwest Normal University,2004.】

[8] 张志永, 焦剑妮, 张 伟, 等. 桂林市岩溶地下水典型污染物演变过程分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(2): 50 - 54.

【ZHANG Z Y, JIAO J N, ZHANG W, et al. Development process analysis of typical contaminant in Guilin Karst groundwater[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(2): 50 - 54.】

[9] 云南省地质局 水文工程地质公司丘北分队. 中华人民共和国区域水文地质普查报告(1: 200000)丘北幅[R]. 云南省地质局, 1981:10 - 11, 135 - 138.

【Yunnan Geological Survey of Hydrological Engineering Geology Company Hill North Division. 1: 200000 regional hydrological address census of Qiubei[R]. Yunnan Province Geological Survey, 1981:10 - 11, 135 - 138.】

[10] 许效天, 李广宇, 张 喜, 等. 喀斯特森林随降水流动的主要元素动态研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 134 - 139.

【XU X T, LI G Y, ZHANG X, et al. Main nutrients dynamic along with precipitation of Karst Forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 134 - 139.】

[11] 邓新辉, 蒋忠诚, 覃小群, 等. 广西弄拉岩溶植被的表层水文地球化学效应[J]. 山地学报, 2008, 26(2): 170 - 179.

【DENG X H, JIANG Z C, QIN X Q, et al. Epi-hydrogeochemical effects of Karst vegetation in Nongla, Guangxi[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(2): 170 - 179.】

[12] 沈利娜, 邓新辉, 蒋忠诚, 等. 表层岩溶带生态系统的水文地球化学效应——以弄拉兰电堂泉域为例[J]. 地球与环境, 2010, 38(2):189 - 197.

【SHEN L N, DENG X H, JIANG Z C, et al. Hydrogeochemical effects of Epikarst Zone ecosystem——a case study of the Landiantang Spring catchment in Nongla[J]. Earth and Environment,2010, 38(2): 189 - 197.】

[13] 王 迪, 许 模, 漆继红, 等. 滇东南丘北区峰丛-洼地地貌形态特征分析[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 239 - 245.

【WANG D, XU M, QI J H, et al. Analysis on morphologic features of the peak-cluster depression in Qiubei, Southeast Yunnan[J].Carsologica Sinica, 2010, 29(3): 239 - 245.】

[14] 章 程, 蒋忠诚, 何师意, 等. 垂直气候带岩溶动力系统特征研究——以重庆金佛山国家级自然保护区为例[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 510 - 514.

【ZHANG C, JIANG Z C, HE S Y, et al. The Karst dynamic system of vertical zoned climate region: a case study of the Jinfo Mountain state nature reserve in Chongqing[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006,27(5): 510 - 514.】

[15] LIU Z H, LI Q, SUN H L, et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO₂ and dilution effects[J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(1/2):

207 - 223.

[16] 杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳. 降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3376 - 3381.

【YANG P H, LIU Z Q, HE Q F. Transportation and sources of the suspended particle in a karst spring during a storm event[J]. Environmental Science, 2012, 33(10): 3376 - 3381. 】

[17] 于正良, 袁道先, 杨平恒, 等. 基于 PCA 和在线监测技术研究旅游活动对岩溶地下水水化学的影响[J]. 地球学报, 2016, 37(2): 232 - 240.

【YU Z L, YUAN D X, YANG P H, et al. Influences of tourism activities on hydrochemistry of karst groundwater revealed by principal component analysis and on-line monitoring technique[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(2): 232 - 240. 】

[18] 曾昭霞, 刘孝利, 王克林, 等. 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落物储量及持水特性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1429 - 1434.

【ZENG Z X, LIU X L, WANG K L, et al. Litter standing biomass and water-holding characteristics in typical primary and secondary forests in karst region of northwest Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1429 - 1434. 】

[19] 唐益群, 张晓晖, 周 杰, 等. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究——以贵州普定县陈旗小流域为例[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 121 - 127.

【TANG Y Q, ZHANG X H, ZHOU J, et al. The mechanism of underground leakage of soil in karst rocky desertification areas—a case in Chenqi small watershed, Puding, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(2): 121 - 127. 】

[20] 姜光辉, 郭 芳, 于 爽. 岩溶水系统的水化学曲线及其在水文地质研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(3): 899 - 907.

【JIANG G H, GUO F, YU S. Chemographs of Karst water system and its new application in hydrogeological survey[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(3): 899 - 907. 】

[21] 李清艳, 何师意, 康志强, 等. 岩溶森林区地下河流域水文地球化学特征研究——以贵州荔波板寨地下河为例[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 305 - 311.

【LI Q Y, HE S Y, KANG Z Q, et al. Study on hydrogeochemical features in Karst forest underground river catchment of Banzhai, Libo, Guizhou[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(21): 305 - 311. 】