

泉水流量、电导率、pH 值动态变化研究

余保汶¹, 肖敏杰², 王 旭³, 费 璇⁴

1. 中国电建集团国际工程有限公司, 北京 100036; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;
3. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;
4. 北京体育大学 新闻与传播学院, 北京 100084

摘 要: 岩溶水是指赋存于岩溶孔隙中的地下水, 是我国南方生产生活主要用水来源。随着社会对水资源需求的逐步扩大, 岩溶水资源的开发利用越发重要。通过定期监测岳麓山泉水流量、电导率、pH 值, 结合岳麓山岩土层性质和长沙市降雨量, 采用统计分析和 Spearman 秩相关系数法对泉水流量变化和泉水水质定性评价进行研究。研究表明, 大气降雨对岩溶水进行补给从而使泉水流量增大, 泉水流量的改变除与降雨量有关外, 还受土壤入渗率和降雨时长的影响。采用 Spearman 秩相关系数法可定量计算电导率与时间的相关性, 间接判断周围环境对泉水水质影响的难易程度, 有利于识别电导率代表性位置泉眼, 更好地监测和评价岩溶水。土壤酸沉降污染严重或酸雨频繁地区易导致岩溶水 pH 值呈酸性。对泉水流量和水质的研究有利于科学开发利用岩溶水资源。

关键词: 岩溶泉; 水质; 入渗率; 电导率; pH 值; 岳麓山

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.04.012

STUDY ON THE DYNAMIC CHANGES OF SPRING FLOW, CONDUCTIVITY AND pH VALUE

YU Bao-wen¹, XIAO Min-jie², WANG Xu³, FEI Xuan⁴

1. Power China International Group Limited, Beijing 100036, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming 650051, China;
4. School of Journalism and Communication, Beijing Sport University, Beijing 100084, China

Abstract: Karst water, referring to the groundwater that is hosted in karst pores, serves as the major water source for production and life in southern China. With the increasing social demand for water, the development and utilization of karst water resources is becoming more and more important. By regularly monitoring the spring flow, conductivity and pH value of Yuelu Mountain, combined with the rock-soil layer property of Yuelu Mountain and rainfall of Changsha City, the statistical analysis and Spearman rank correlation coefficient method are used to study the spring flow changes and qualitatively evaluate the water quality. The results show that rainfall replenishes karst water and increases spring flow. The spring flow is not only related to rainfall but also affected by soil infiltration rate and rainfall duration. The Spearman rank correlation coefficient method can be used to quantitatively calculate the correlation between conductivity and time, and indirectly judge the influence of surrounding environment on spring water quality, which is conducive to identify the representative location of conductivity, better monitor and evaluate karst water. The pH value

收稿日期:2019-11-19; 修回日期:2020-02-22. 编辑:李兰英.

基金项目:国家自然科学基金项目“倾斜岩层面的软岩嵌岩群桩承载机理研究”(编号 51378403).

作者简介:余保汶(1995—),男,岩土工程硕士,工程师,主要从事岩土工程研究,通信地址 北京市海淀区西翠路 17 号院 23 号楼, E-mail// ybwenwen1995@foxmail.com

of karst water tends to be acidic in areas with serious acid precipitation pollution of soil or frequent acid rain. The study of spring flow and water quality is beneficial to scientific development and utilization of karst water.

Key words: karst spring; water quality; infiltration rate; conductivity; pH value; Yuelu Mountain

0 引言

随着城市人口的不断增加和工业发展的需要, 水资源的缺乏已成为很多城市发展问题^[1-2]. 岩溶地貌是我国广泛发育的一种地质现象. 岩溶裂隙的发育加速了地表水转换为地下水, 有利于水资源的存储. 岩溶水是岩溶地区主要的生产和生活用水来源. 泉水为岩溶水在地表的一种表现形式, 对泉水物理化学性质的动态研究有利于岩溶水资源的充分利用. 实际监测和理论研究表明: 降雨将会引起泉水水化学性质的变化^[3]; 景观类型和结构的变化将引起表层岩溶泉水的动态变化^[4]; 雨水、土层和含水层岩性偏酸性, 是导致地下水偏酸性的原因之一^[5]; 采用地下水导电率代表性位置点来开展监测研究是可行的^[6]; 岩溶泉水的 pH 值和水温与降雨量和气候有关, 同时降雨也是引起岩溶泉水污染的原因^[7]; 受大气降雨和地层中石膏溶解的影响, 在水岩交互作用下, 大量硫酸根离子进入地下水^[8]; 地下水受有机污染和硝酸盐的影响, 微生物种群结构将会对地下水污染发生响应, 利用在某一污染组具有优势的细菌对地下水污染进行监测, 具有良好的应用前景^[9]; 地下水与离子含量的形成受构造运动和地质条件的共同影响, 地下水中主离子主要来源于岩层溶解, 地下水化学演化特征主要受时间、空间、气候、地层、人类活动等因素影响^[10]; 在地热资源丰富地区, 在地下水更替频繁、冷水混入比例大、水循环深度较浅条件下, 地下水化学成分受控于水-岩作用的强弱^[11]. 通过数值模型和数理统计可知: 在限定开采井水位降深低于承压含水层顶板条件下, 建立 GMS 模型能准确预测出地下水的渗流补给关系和允许开采量^[12]; 水动力条件和环境地形地貌对地下水的指标分布 (TDS 指标、钙、镁、钠元素等) 起主导作用^[13]; 水资源利用率低和产业结构不合理将降低水资源的承载能力^[14].

入渗是指地表水渗入地层的物理现象, 入渗率是指地表水单位时间内渗入单位面积地层的量, 地表水的入渗是地表水转换为岩溶水的中间过程. 以往对泉水流量变化往往从降雨量、地表水等补给的角度分析,

很少考虑地表水渗入地层到达储水层转换为岩溶水这一中间过程的影响. 对泉水水质的评价常常通过测量泉水的各项物理化学指标进行定量的评价. 虽然评价结果精确, 但测量过程复杂, 且泉水水质会随着外界因素的影响而发生变化, 需要不断监测才能了解不同时间泉水的水质情况.

本文通过监测岳麓山泉水流量、电导率、pH 值、长沙市降雨量, 结合岳麓山的岩土层性质, 采用统计分析和 Spearman 秩相关系数法, 分析地层入渗率对降雨量和泉水流量的影响及泉水呈酸性的原因, 通过计算电导率与时间相关系数来定性评价岩溶水水质受外界环境影响的难易程度.

1 研究区域概况及研究方法

长沙市东、西、北三面环山, 中部地势较低, 呈马蹄形的丘陵盆地. 岳麓山位于长沙市岳麓区湘江西岸, 由扭动构造形成, 为盆地中隆起的小型山脉, 地势由中部向南北方向呈下降趋势, 东坡平缓, 东南坡较陡峻, 山脊线北段向北东延伸, 南段呈南东走向, 占地面积约为 7.9 km², 最高海拔为 300.8 m. 岳麓山地层主要为岳麓砂岩、页岩, 部分区域有石灰岩和泥灰岩, 土层主要为残坡积土, 覆盖厚度在 0.5~4 m 之间. 该地区为典型的亚热带季风气候, 夏季高温, 冬季湿冷, 年平均降雨量在 1200~1400 mm 之间, 无明显干季, 降雨主要集中在冬春季, 3~5 月为梅雨季节, 7~8 月常见暴雨. 岳麓区地下水资源丰富, 岳麓山泉水点较多, 可供给周围居民作为日常饮用水, 这些泉水点丰富了市民的生活, 也是岳麓山的景观之一.

本次研究从 2015 年 11 月至 2016 年 11 月以每周一次的监测频率, 对岳麓山上三处泉水点的流量以及长沙市岳麓区周降雨量进行监测. 2016 年 5~11 月以每周一次的监测频率对三处泉水点的 pH 值和电导率进行监测. 三处泉水点分别记为 1 号、2 号、3 号泉眼 (图 1). 流量监测采用固定容器 (5 L) 和秒表进行测量, pH 值测量采用雷磁公司生产的 PHS-25PH 计, 精

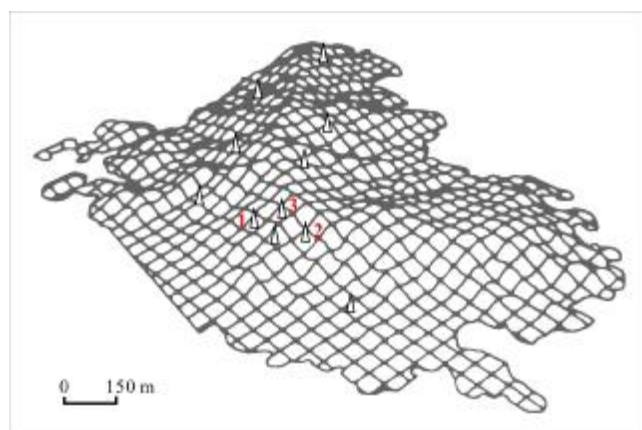


图 1 岳麓山泉水分布图

Fig. 1 Distribution of springs in Yuelu Mountain

1—1 号泉眼(No. 1 spring); 2—2 号泉眼(No. 2 spring); 3—3 号泉眼(No. 3 spring)

度为 0.01 pH. 电导率测量采用雷磁公司生产的 DDBJ-350 便携式电导率仪, 精度为 0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$. 通过湖南气象官网发布的长沙市日降雨量值, 记录降雨量. 结合已有文献和实地踏勘, 对岳麓山的地层产状、岩石类型及特点、土的性质进行分析.

2 水文地质条件

岳麓山植被丰富, 表层土壤主要为坡积土、植积土, 土层孔隙度较大, 透水性较好, 土层厚度在 1~4 m 之间. 残坡积土按母岩性质分属于钙泥质类岩石残坡积土, 天然含水量和液限、塑限较高, 塑性指数为 15.8, 属于粉质黏土, 土壤入渗初期的人渗率范围为 71.3~

188.5 mm/h, 在之后 6~7 min 内, 水分入渗速率快速下降, 并基本趋于稳定, 稳定后渗流速度维持在 7.6~9.0 mm/h 之间. 土层以下为节理裂隙强烈发育的岩层, 岩性多为石英砂岩、泥质粉砂岩、砂质页岩, 岩层为主要含水层. 破碎的岩层在纵向剖面逐渐过渡为基本没有节理裂隙的不透水的新鲜岩层.

3 号泉眼附近的土体厚约 0.5~1 m, 土壤为硬塑且湿度较大, 粒径为 0.05~0.075 mm. 下部岩层为微风化紫色石英砂岩, 夹杂着少量砂质页岩. 岩石较破碎, 为块状堆积, 破碎岩层之间由土和小石块填充, 有少量地下水溢出, 未发现断层. 1、2 号泉眼附近土层较薄, 大部分地方岩层出露. 泉眼东侧有一断层, 断面近直立. 岳麓山地层类型为泥盆纪粉砂岩, 该处岩层为层状构造, 受构造作用而形成褶皱背斜, 核部受挤压形成张节理和环状节理, 向斜形成 X 节理, 核部裂隙发育. 该断层节理裂隙发育强烈, 岩层主要由微风化石英砂岩和砂质页岩组成, 岩层以上主要由细小的碎石和砂土覆盖. 断层附近有泉水出露, 并汇集成流.

3 泉水流量分析

图 2 为 2015 年 11 月至 2016 年 11 月降雨量统计. 由图 2 可见, 监测期间年降雨量为 919 mm, 日最大降雨量为 80.4 mm, 降雨主要分布在 2015 年 11 月, 2016 年 4 月、6 月和 10 月. 3~4 月为梅雨季节, 特点为降雨持续时间长但降雨量较小; 6~8 月为夏季, 降雨多为阵雨, 降雨持续时间短但降雨量大. 1、2、5、9 月降雨量较少.

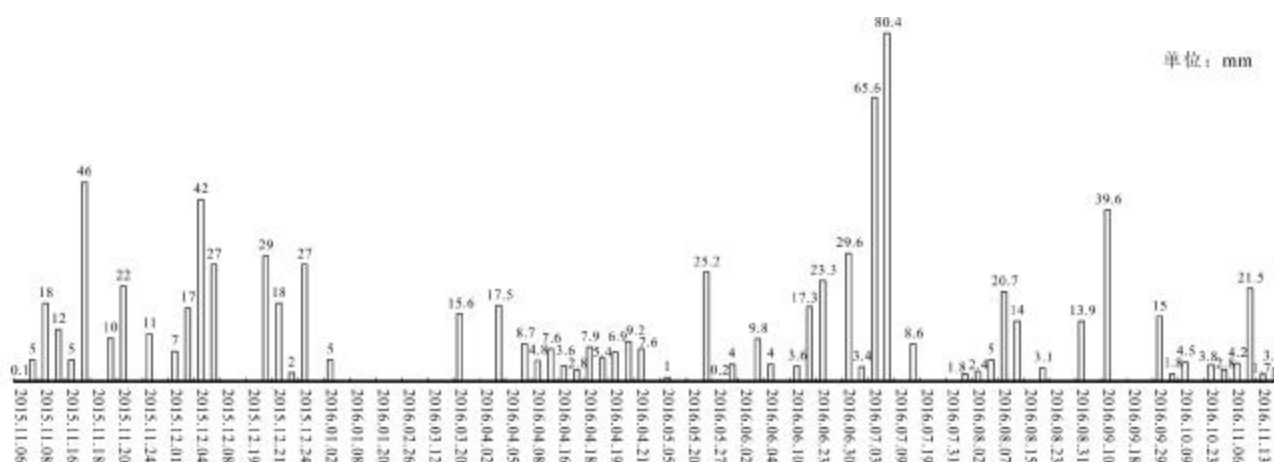


图 2 2015 年 11 月至 2016 年 11 月长沙市降雨量统计表

Fig. 2 Rainfall statistics in Changsha City during Nov. 2015-Nov. 2016

图3为2015年11月至2016年11月三处泉眼流量随时间的变化趋势图。由图3可知三处泉眼流量变化趋势基本相同。2号泉眼的流量在3.45~27.27 L/min的范围变动,年平均流量为9.01 L/min;1号泉眼的流量在0.92~2.78 L/min的范围变动,年平均流量为1.39 L/min;3号泉眼的流量在0.36~1.40 L/min的范围变动,年平均流量为0.78 L/min。

图4~6为2015年11月至2016年11月三处泉眼泉水流量随周累计降雨量变化图。由图4~6可知三处泉水流量冬春季较夏秋季大,2015年11月至12月降雨量较大,三处泉眼流量较大;2015年12月至2016年1月泉水流量减小,同时降雨量减少;3~4月

随着梅雨季节的到来,三处泉眼泉水流量快速增加,达到全年最大,5月以后泉水流量逐渐下降,其后泉水流量随降雨量虽有波动但变化幅度不大。对比全年周累计降雨量和泉水流量可以发现,2016年3~4月三处泉水流量明显比2015年11月和2016年6~7月流量大,但降雨量却偏小,可知泉水流量虽随降雨量的增加而增加,但泉水流量的增量并不与降雨量增量呈现完全的正相关关系。

岳麓山土层多为残坡积土,土壤入渗初期由于非饱和土壤具有吸水性入渗率71.3~188.5 mm/h,土壤润湿后,水分入渗速率快速下降并逐渐趋于稳定,稳定后的土壤入渗速率约为7.6~9.0 mm/h。2015年11月、

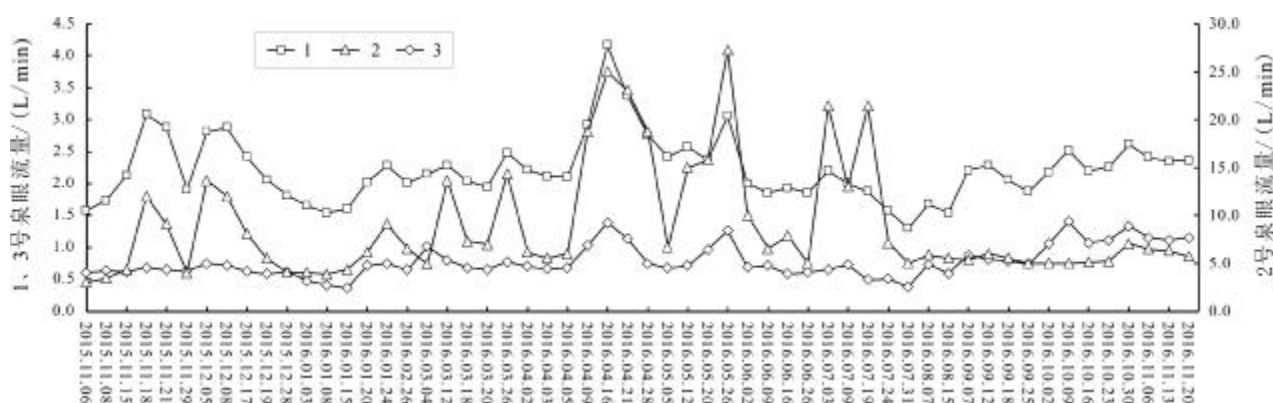


图3 2015年11月至2016年11月1、2、3号泉眼流量变化趋势图

Fig. 3 Discharge variations of Nos. 1, 2 and 3 springs during Nov. 2015-Nov. 2016

1—1号泉眼(No. 1 spring); 2—2号泉眼(No. 2 spring); 3—3号泉眼(No. 3 spring)

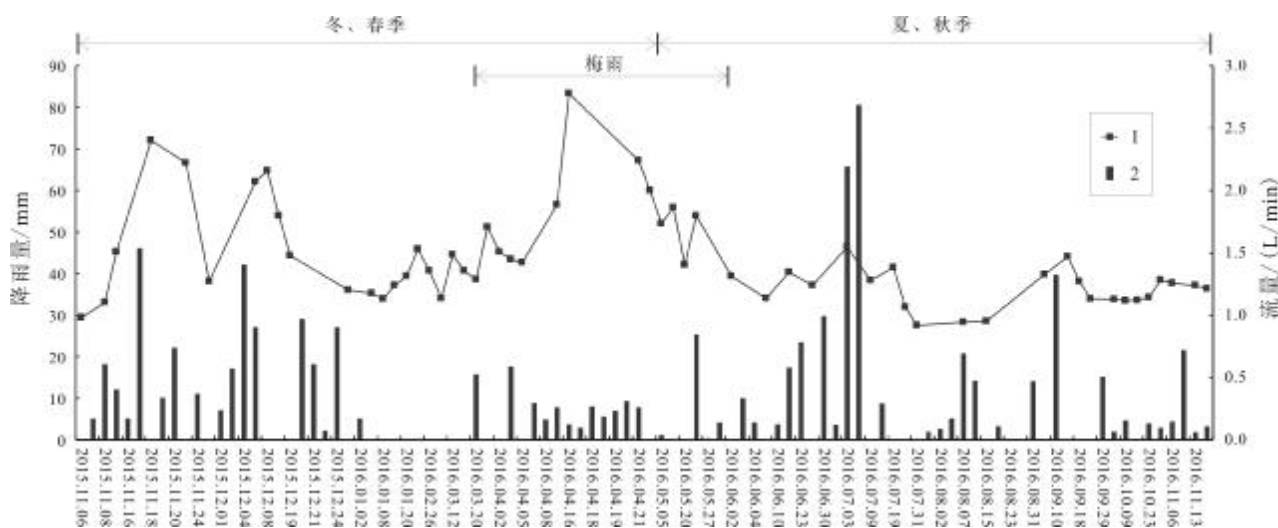


图4 周累计降雨量与1号泉眼流量关系图

Fig. 4 Relation between weekly cumulative rainfall and No. 1 spring flow

1—1号泉眼流量(No. 1 spring flow); 2—降雨量(rainfall)

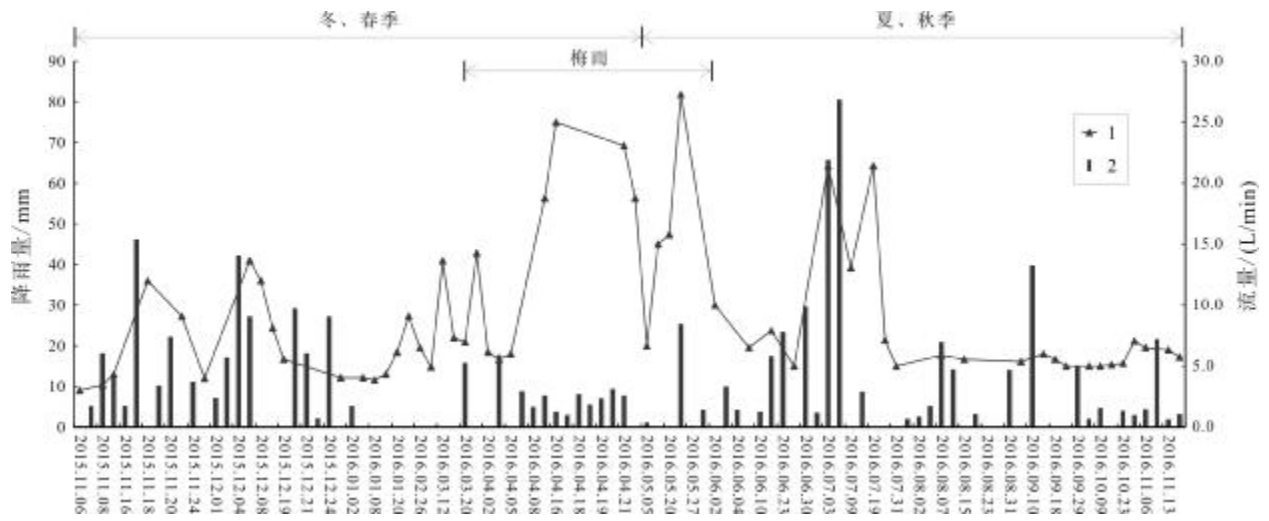


图 5 周累计降雨量与 2 号泉眼流量关系图

Fig. 5 Relation between weekly cumulative rainfall and No. 2 spring flow

1— 2 号泉眼流量(No. 2 spring flow); 2—降雨量(rainfall)

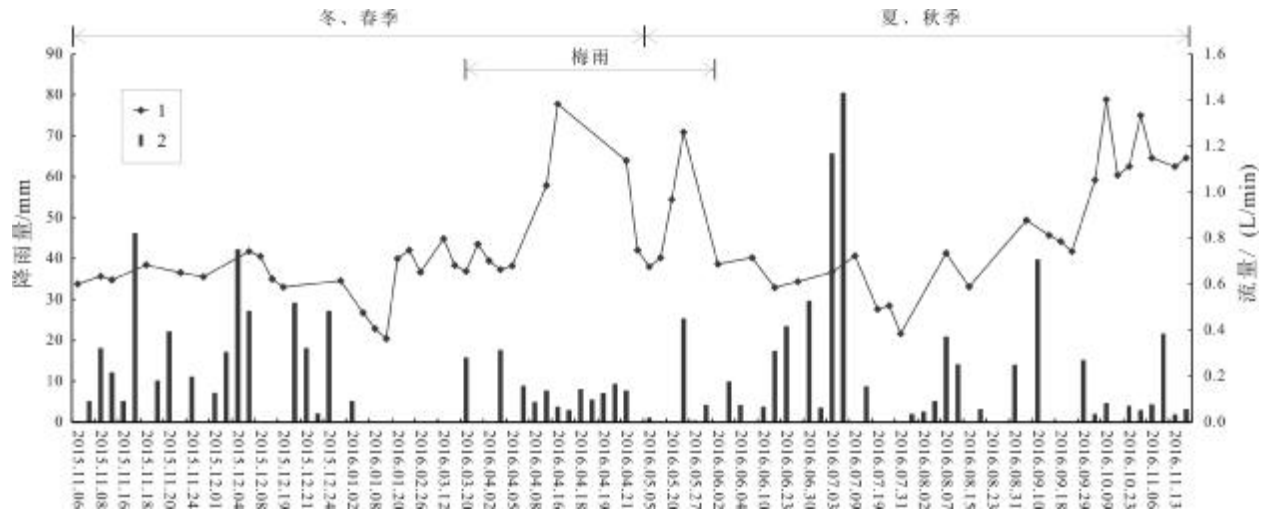


图 6 周累计降雨量与 3 号泉眼流量关系图

Fig. 6 Relation between weekly cumulative rainfall and No. 3 spring flow

1— 3 号泉眼流量(No. 3 spring flow); 2—降雨量(rainfall)

2016 年 6~7 月多为阵雨, 虽降雨量大但降雨时长较短, 下落雨水未来得及渗入地层就沿坡面流向坡脚, 7 月 3 日和 4 日日降雨量分别为 65.6 mm 和 80.4 mm, 远高于全年其他时候的降雨量, 但降雨为突发性暴雨, 降雨时长在 2 h 左右, 降雨时间短, 雨水来不及充分渗入地层便沿坡面流下坡脚, 泉水补给量少, 因此泉水流量的增加并不明显. 2016 年 3~4 月降雨量虽较小, 但处于长沙梅雨季节, 为连续的阴雨天气, 降雨量小但降雨时间长, 有利于雨水充分渗入地层, 泉水补给量大, 因此泉水流量大.

为充分说明降雨量与泉水流量的关系, 以 1 号泉眼为例作相邻监测点泉水流量差与周累降雨量关系图, 如图 7 所示: 以周累计降雨量大于 85% 的周累计降雨量和最大泉水流量差大于 50% 的泉水流量为分界限, 将图 7 分为 A、B、C、D 四个区域. A 区代表降雨量小, 泉水流量变化小; C 区代表降雨量大, 泉水流量变化大. 从雨水渗入地层为泉水的补给角度的分析, 符合降雨量对泉水流量的影响规律. B 区代表降雨量小, 泉水流量变化大; D 区代表降雨量大, 泉水流量变化小. 说明入渗作为大气降雨向岩溶水转变的中间过

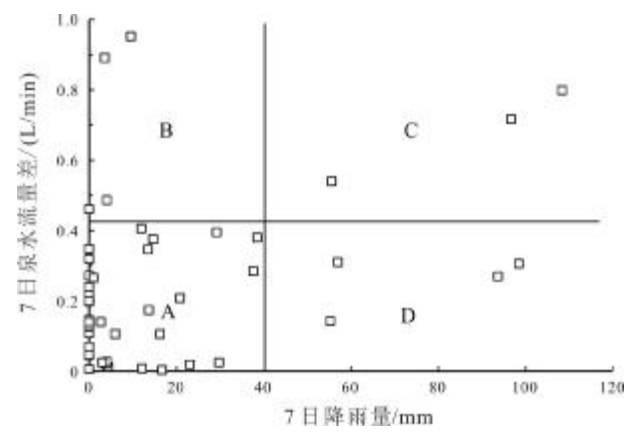


图 7 1 号泉眼泉水流量差与周累计降雨量关系图

Fig. 7 Relation between No. 1 spring flow difference and weekly cumulative rainfall

程,有着不能忽视的影响.其中B 区对应上文梅雨期,D 区对应上文 7 月阵雨期.

4 泉水电导率分析

电导率常用于评价土壤盐渍化和地下水水质,是评价灌溉水质量的国际通用标准.电导率的大小反映了溶液中带离子浓度,电导率值越小代表水质受污染的程度越小.基于电导率测定值对盐水分[15]如表 1 所示.

表 1 根据电导率测定值对盐水进行分类

Table 1 Classification of brine by measured conductivity values

纯水	微含盐水	中含盐水	高含盐水	极高含盐水	卤水
<700	700~2000	2000~10000	10000~20000	20000~45000	>45000

电导率单位: $\mu\text{s}/\text{cm}$.

经监测发现 1 号泉眼和 2 号泉眼的 pH 值、电导率相同,在此只分析 1 号和 3 号泉眼泉水.图 8 为电导率随时间变化规律图.1 号泉眼的电导率在 1670~1836 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间波动,平均电导率为 1739 $\mu\text{s}/\text{cm}$,泉水为微含盐水.3 号泉眼的电导率在 1665~1695 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间波动,平均电导率为 1679 $\mu\text{s}/\text{cm}$,较 1 号泉眼电导率低,为微含盐水.

Spearman 秩相关系数法,可定量评价两个相互独立变量之间的相关性以及相关程度.相关系数接近于 0 时,说明两个独立变量之间相关性很小.相关系数接近于 ± 1 时,说明两个独立变量之间的相关性很大.如果两个独立变量之间呈严格单调函数关系,则

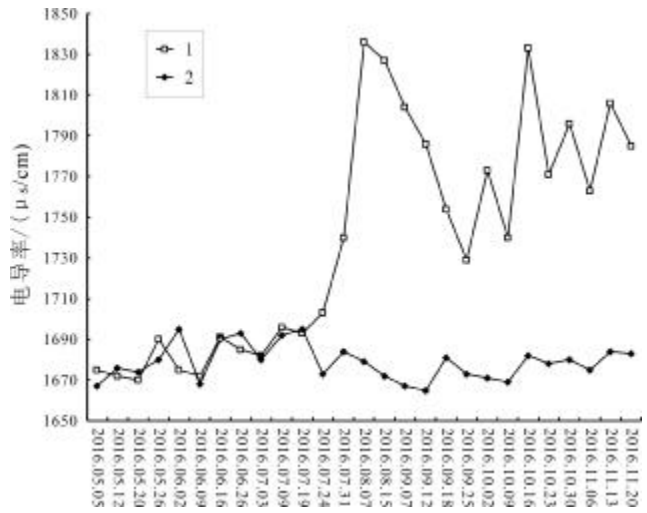


图 8 1 号、3 号泉眼电导率随时间变化趋势图

Fig. 8 Conductivity variation with time for Nos. 1 and 3 springs

1—1 号泉眼(No. 1 spring); 2—3 号泉眼(No. 3 spring)

相关系数值为 ± 1 .计算电导率与时间的 Spearman 秩相关系数,定量评价时间与电导率的相关性,可间接判断周围环境对泉水水质影响的难易程度,有利于识别电导率代表性位置泉眼,更好地监测和评价岩溶水.采用 Spearman 秩相关系数法计算 1、3 号泉眼时间稳定性,数据中存在相同秩次,采用下式计算秩次间 Pearson 的线性相关系数.

$$\rho_s = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \tag{1}$$

式中, ρ_s 为 Pearson 的线性相关系数; x_i 和 y_i 分别为变量 x 和变量 y 的样本观测值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为变量 x 和变量 y 的样本平均值.

根据式 (1) 计算 1 号、3 号泉眼电导率随时间的 Pearson 线性相关系数,计算参数如表 2 所示,记监测日期和电导率分别为 x_i 和 y_i .假设样本观测值 x_i 和 y_i 按大小排列的顺序分别为 x'_i 和 y'_i ,则 x'_i 和 y'_i 为 x_i 和 y_i 的秩次.当样本观测值 x_i 和 y_i 的数值相同时,采用排列顺序的平均值作为秩次.将表 2 中 x'_i 和 y'_i 带入式 (1) 求出 1 号泉眼 $\rho_{s1} = -0.804$, 3 号泉眼 $\rho_{s3} = 0.033$.1 号泉眼电导率随时间的 Pearson 相关系数接近于 ± 1 ,说明 1 号泉眼泉水电导率与时间具有较强的相关性,泉水水质在外界环境影响下容易发生变化.3 号泉眼电导率随时间的 Pearson 系数接近于 0,说明 3 号泉眼泉水电导率与时间基本没有相关性,外界环境对泉水水质影响较小.

表 2 1 号、3 号泉眼 Spearman 秩相关系数计算数据
Table 2 Calculated result of Nos. 1 and 3 springs by
Spearman rank correlation coefficient

日期	1 号泉眼			3 号泉眼		
	电导率/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	x_i'	y_i'	电导率/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	x_i'	y_i'
2016.05.05	1675	1	22	1667	1	20
2016.05.12	1672	2	23	1676	2	12
2016.05.20	1670	3	24	1674	3	14
2016.05.26	1690	4	19	1680	4	9
2016.06.02	1675	5	22	1695	5	1
2016.06.09	1672	6	23	1668	6	19
2016.06.16	1691	7	18	1690	7	4
2016.06.26	1685	8	20	1693	8	2
2016.07.03	1682	9	21	1680	9	9
2016.07.09	1696	10	16	1692	10	3
2016.07.19	1693	11	17	1695	11	1
2016.07.24	1703	12	15	1673	12	15
2016.07.31	1740	13	13	1684	13	5
2016.08.07	1836	14	1	1679	14	10
2016.08.15	1827	15	3	1672	15	16
2016.09.07	1804	16	5	1667	16	20
2016.09.12	1786	17	7	1665	17	21
2016.09.18	1754	18	12	1681	18	8
2016.09.25	1729	19	14	1673	19	15
2016.10.02	1773	20	9	1671	20	17
2016.10.09	1740	21	13	1669	21	18
2016.10.16	1833	22	2	1682	22	7
2016.10.23	1771	23	10	1678	23	11
2016.10.30	1796	24	6	1680	24	9
2016.11.06	1763	25	11	1675	25	13
2016.11.13	1806	26	4	1684	26	5
2016.11.20	1785	27	8	1683	27	6

结合图 3~6 可知, 3 号泉眼的流量小于 1、2 号泉眼, 且变化较 1、2 号泉眼稳定. 结合三处泉眼的水文地质条件可知, 1、2 号泉眼附近主要为节理裂隙强烈

发育的粉砂岩, 降雨时, 雨水通过岩石裂隙迅速对地下水进行补给, 在裂隙发育强烈的低洼处迅速排出, 地下水的循环速度较快, 因而泉水水质容易受外界环境的影响. 3 号泉眼附近主要为土层和碎石土, 降雨时, 雨水渗入土层储存在含水层中, 含水层中的储水在裂隙强烈发育且与外界相通的地方渗出, 同时森林植被和土壤对含水层中的储水起到了一个缓冲的作用, 在雨季地层水量丰富的时候将部分水分储存起来, 在旱季地层含水较少时又将水分释放出来, 地下水的循环速度较慢, 因而泉水水质受外界环境的影响较小^[16-17].

如图 8 所示, 电导率随时间的变化规律符合 Spearman 秩相关系数计算结果. 在实际生产生活中对地下水水质进行监测时, 为科学合理地设置各监测点监测频率和充分了解水质的变化, 可增加监测量与时间相关系数接近于 ± 1 的监测点的监测频率, 降低监测量与时间相关系数接近于 0 的监测点的监测频率.

5 泉水 pH 值分析

由图 9、10 所示, 1 号泉眼泉水 pH 值为 3.6~4.0, 3 号泉眼泉水 pH 值为 4.5~5.1, 泉眼水质均为酸性, 同时随着泉水流量的增加, 泉水 pH 值存在下降趋势. 通过对不同季节降雨 pH 值进行随机取样监测可知, 夏季雨水 pH 值为 5.43, 冬季雨水 pH 值为 3.91, 降雨为酸雨 (pH 值 < 5.6). 以往研究表明, 长沙市酸雨为硫酸型, 其酸度高, 频率高, 污染重. 1981~1984 年间, 长沙市酸雨频率为 50%~70%; 1985~1995 年和 2001~2005

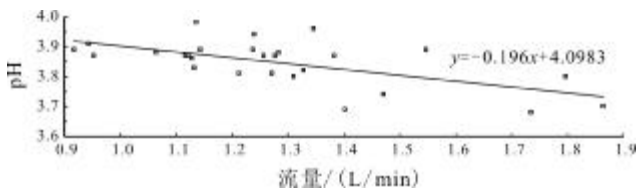


图 9 1 号泉眼 pH 值与流量关系图
Fig. 9 Relation between No. 1 spring flow and pH value

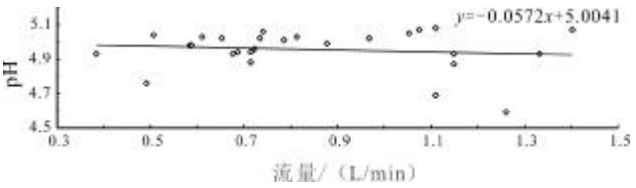


图 10 3 号泉眼 pH 值与流量关系图
Fig. 10 Relation between No. 3 spring flow and pH value

年,酸雨频率在 80%以上,并逐年上升, pH 最低值为 2.65^[18-19]。常年高频率、高酸度的酸雨使岳麓山地区酸沉降污染严重,岳麓山森林小流域土壤酸度较低,土壤 pH 值在 4.5 以下^[20]。因此,酸雨与土壤酸沉降是导致泉水呈酸性的主要原因。同时 3 号泉眼 pH 值大于雨水 pH 值,且与土壤 pH 值接近,说明土壤对雨水的酸性起到了缓冲作用。

6 结论

本文通过实地监测,采用统计分析和 Spearman 秩相关系数法研究土壤入渗率对岩溶水补给作用的影响,土壤酸沉降对岩溶水 pH 值的影响。通过计算电导率与时间的相关性定性评价泉水水质受环境影响的难易程度。得到以下结论。

1) 泉水的流量与降雨量呈正相关关系,但受土壤入渗率和降雨时长的影响,长时间的连绵细雨更有利于雨水渗入地层补充岩溶水,使泉流量增大。

2) 通过计算电导率与时间的相关性可间接判断出泉水水质受外界环境影响的难易程度,找出电导率代表性位置泉眼,有利于合理规划各泉眼的监测频率,科学了解泉水水质变化。

3) 森林植被和土壤的存在有利于降低地下水的循环速度,减少外界环境对泉水流量、水质的影响。降酸雨或土壤受酸沉降污染容易导致岩溶水 pH 值偏酸性,随流量的增加泉水 pH 值呈下降趋势。

参考文献:

- [1] 田辉,郭晓东,刘强,等. 大庆市地下水开采现状及环境地质问题探讨[J]. 地质与资源,2012,21(1):139-142.
- [2] 缪晓宇,郭昂青. 黑龙江省松嫩平原地下水资源开发利用中主要问题及对策[J]. 地质与资源,2010,19(2):105-108,113.
- [3] 李强,孙海龙,韩军,等. 降水对广西马山兰电堂泉水化学动态变化观测研究[J]. 水科学进展,2006,17(5):733-737.
- [4] 姚昕,夏日元,唐健生,等. 湘西洛塔岩溶生态微景观结构对表层岩溶泉的影响[J]. 中国水土保持,2006(11):35-37.
- [5] 欧业成,陈润玲,黄喜新,等. 北海市滨海地下水天然偏酸性特征及其影响因素[J]. 桂林理工大学学报,2009,29(4):449-454.
- [6] 徐国策,刘海波,申震洲,等. 洛惠渠灌区地下水电导率时间稳定性分析[J]. 农业工程学报,2015,31(10):115-121.
- [7] 扈志勇,杨平恒,杨梅,等. 川东槽谷区岩溶泉水物理化学动态特征及其环境效应研究——以重庆青木关岩溶槽谷姜家泉为例[J]. 现代地质,2009,23(6):1167-1173.
- [8] 曹建文,夏日元,方尚武,等. 云贵高原斜坡地带典型地下水富硫酸盐地区“越层找水”模式及其机理研究[J]. 中国地质,2019,46(2):235-243.
- [9] 何泽,宁卓,黄冠星,等. 太行山前平原浅层地下水污染的分子生物学响应特征——以滹沱河流域为例[J]. 中国地质,2019,46(2):290-301.
- [10] 孙厚云,毛启贵,卫晓锋,等. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质,2018,45(6):1128-1141.
- [11] 许鹏,谭红兵,张燕飞,等. 特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与源机制[J]. 中国地质,2018,45(6):1142-1154.
- [12] 孙跃,岳运华,刘中刚,等. 基于 GMS 的傍河应急水源地下水水资源评价[J]. 地质与资源,2019,28(1):72-77.
- [13] 耿婷婷,李颖智,张涛,等. 西藏“一江三河”地区地下水环境背景值初步研究[J]. 地质与资源,2018,27(5):480-487.
- [14] 马立新,吴丽. 通辽市水资源承载能力的多层次多指标可变模糊评价研究[J]. 地质与资源,2018,27(1):83-88.
- [15] Yadav S, Irfan M, Ahmad A, et al. Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: a review[J]. Journal of Environmental Biology, 2011,32(5):667-685.
- [16] 王小娜,王金生,吴东杰,等. 北京市泉水变化状况及原因分析[J]. 水文地质工程地质,2010,37(4):28-32.
- [17] 杨平恒,罗鉴银,袁道先,等. 降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J]. 水利学报,2009,40(1):67-74.
- [18] 方至. 长沙市酸雨现状分析[J]. 湖南农业大学学报,1998,24(1):43-46.
- [19] 杨宇红. 长沙市市区近 5 年酸雨变化趋势及相关因素分析[J]. 湖南有色金属,2005,21(6):28-30.
- [20] 李炳文. 长沙岳麓山小流域水-土系统对酸沉降的响应研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2009.