

云南省青龙洞泉水旱雨季水位动态变化及其与水体理化因子的关系

莫萧天, 刘 宏*

云南大学, 地球科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2023年10月12日; 录用日期: 2023年12月5日; 发布日期: 2023年12月15日

摘 要

研究岩溶洞泉水的水位变化规律及其与水体理化因子的关系对进一步认识岩溶水循环机制以及加强泉水水质保护都有着重要的意义。本文以云南省青龙洞泉水作为研究对象, 先对青龙洞泉水自然状况、附近的岩层组成和地表河流分布情况进行分析; 通过对各水文要素旱雨季动态变化图分析发现泉水水位的变化存在季节差异, 即旱季和雨季变化的情况不同, 旱季较为规律呈周期性变化, 雨季则呈阶段性变化, 且雨季泉水水位显著高于旱季。本研究通过计算旱季和雨季水文要素间的皮尔逊相关系数, 发现水文要素间的相关关系随季节变化也会发生变化, 同时雨季水文要素间的关联性显著高于旱季。方差分析得出泉水水文要素的值存在显著的季节差异。通过建立水位与水体理化因子间的多元回归模型并进行逐步回归得出, 影响旱季和雨季泉水水位最大的因子均为水温, 同时两个季节的水温与水位均呈负相关关系。

关键词

青龙洞泉水, 旱雨季, 水位, 水体理化因子, 地质条件, 水文动态分析

Dynamic Changes of Water Level of Qinglongdong Spring Water in Yunnan Province during Dry and Rainy Seasons and Its Relationship with Physicochemical Factors of Water Body

Xiaotian Mo, Hong Liu*

School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 莫萧天, 刘宏. 云南省青龙洞泉水旱雨季水位动态变化及其与水体理化因子的关系[J]. 地理科学研究, 2023, 12(6): 718-726. DOI: 10.12677/gser.2023.126068

Abstract

Understanding the rules of water level changes in karst cave springs and their relationship with physicochemical factors is of great significance for further understanding the karst water cycle mechanism and strengthening spring water quality protection. This study takes Qinglongdong spring in Yunnan Province as the research object. Firstly, the natural conditions of Qinglongdong spring water, nearby rock formations, and surface river distribution are analyzed. Through the analysis of the dynamic changes in various hydrological elements during the dry and wet seasons, it is found that there are seasonal differences in the changes of spring water level. The changes during the dry and rainy seasons differ, with the dry season showing periodic and regular changes and the rainy season showing staged changes, with the water level during the rainy season significantly higher than that during the dry season. By calculating Pearson correlation coefficients between hydrological elements during the dry and wet seasons, it is found that the correlation between hydrological elements also changes with the seasons, and the correlation between hydrological elements during the rainy season is significantly higher than that during the dry season. Variance analysis shows that there are significant seasonal differences in the values of spring water hydrological elements. By establishing a multivariate regression model between water level and physicochemical factors and conducting stepwise regression, it is found that the factor that has the greatest impact on the water level of Qinglongdong spring during both the dry and rainy seasons is water temperature, and the water temperature and water level in both seasons are negatively correlated.

Keywords

Qinglongdong Spring Water, Dry and Rainy Seasons, Water Level, Physicochemical Factors of Water Body, Geological Conditions, Hydrological Dynamic Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

泉水是指地下水在地下岩石中积蓄并渗出地面形成的水体。泉水一般具有清洁、透明、微酸、少无机物等特点,是自然界中较为珍贵的饮用水资源。由于泉水的地下来源和水质特点等方面的奥秘,泉水研究一直备受关注。

在国内,泉水研究主要涉及泉水的分布、水化学特征、水文地质学 and 环境保护等方面。泉水分布较为广泛,主要分布在喀斯特地区、火山岩地区、断陷盆地和沉积岩地区。泉水的水化学特征与地下水和地表水不同,一般具有较高的硬度、钙、镁等元素含量。在环境保护方面,泉水污染问题也备受关注。

在国外,泉水研究集中在水文地质学、地下水污染、泉水保护和水资源利用等方面。欧洲和美洲是泉水研究的主要国家,其中意大利、斯洛文尼亚和法国等国家泉水资源丰富,曾进行大量的泉水研究。总的来说,泉水研究是一个涉及多个学科领域,对于保护泉水资源、管理地下水资源和预防地下水污染等都具有重要意义。

云南省青龙洞是中国著名的千年古泉之一, 由于旅游开发和工厂建设等因素, 其泉水水质受到较大影响, 并在旱雨季存在较大波动。本研究探明了云南省 2007 年青龙洞地区旱雨季泉水水位的动态变化及其与水体理化因子的关系, 为青龙洞地区泉水水质保护和水位预测提供理论依据。

2. 研究区概况

2.1. 地理位置

青龙洞地区位于中国云南省西南部, 地处滇西高原和广西桂南山区之间, 地理坐标为东经 $102^{\circ}39' \sim 103^{\circ}00'$, 北纬 $24^{\circ}38' \sim 25^{\circ}01'$ 。该地区属于森林山地区, 地形地貌复杂, 由于地处云南高原的中心地带。地理位置十分优越。该地区面积约为 770 平方公里, 其中森林面积占总面积的 80% 以上, 森林覆盖率高达 98%, 是中国南方地区少有的原始森林之一。

2.2. 自然环境

青龙洞的气候属于亚热带湿润季风气候, 具有四季分明的特点。平均气温在 $17^{\circ}\text{C} \sim 18^{\circ}\text{C}$ 之间, 温暖舒适。年降雨量约为 1200~1300 毫米, 年均湿度较高。由于地处高山之中, 青龙洞的气候湿润, 雨水充沛, 给予了青龙洞丰富的植被和生态条件。

青龙洞被茂密的热带雨林所覆盖, 植被繁盛。在青龙洞周围的山区, 可以看到大片的森林和茂密的树木。热带雨林植被种类繁多, 如常绿乔木、竹林、灌木丛等, 生态系统完整。

青龙洞周边的自然环境给予了丰富的生物资源。这里是众多珍稀动植物的栖息地, 如中国特有的物种黑颈长尾雉、金丝猴、熊猫等。青龙洞附近的湖泊和水源也是鱼类和鸟类的栖息地。此外, 青龙洞还有一些稀有植物的分布区, 如野生兰花等。

由图 1 可知, 青龙洞地区有三处污染源: 泉水口隔水层上方有一个水泥加工厂, 西边区域有一个机械工厂, 东边有一个储油库。有一条铁路贯穿整个区域, 隔水层西边修建有桥, 并会对隔水层西边的青龙洞泉水产生影响, 总体来说, 目前青龙洞区域人为活动干扰较强, 区域内水体的保护存在必要性。

2.3. 地质条件

青龙洞周围的岩石主要是碳酸盐岩, 包括石灰岩和大理石。碳酸盐岩是一种由碳酸盐矿物组成的沉积岩, 较为容易受到风化和水侵蚀的影响。青龙洞所在的地区经历了数百万年的风化作用, 风化作用是指岩石在风力的作用下发生化学和物理变化的过程。碳酸盐岩容易受到风化作用的影响, 也易于形成洞穴和溶蚀地貌。青龙洞地区有丰富的降雨资源, 年降雨量较高。水侵蚀是指水流在岩石表面或岩石内部产生溶解和冲刷的作用。碳酸盐岩具有较高的溶解性, 加上长期的水流冲刷, 青龙洞内外的地貌特征逐渐形成。

由于碳酸盐岩容易溶解, 青龙洞所处的喀斯特地貌区形成了丰富的溶洞系统, 如青龙洞内部的石钟乳、石幔等地貌景观。此外, 青龙洞周围也有石笋、石柱、石林、天坑等喀斯特地貌景观, 这些景观形成的过程是长期的风化和水侵蚀作用的结果。

由图 1 可知, 该区域存在两个岩溶洞穴, 分别为青龙洞和黄龙洞, 由非碳酸盐岩层作为隔水层隔绝开来, 青龙洞位于隔水层东侧, 黄龙洞位于隔水层西侧, 两个洞穴附近均存在断层。且可知地表河流分布可知, 地表水对青龙洞和黄龙洞的泉水均存在补给作用。青龙洞泉水的附近的岩层主要为 P, 且由图 2 可知该洞穴的泉水主要来自于 P_1q^2 和 P_1q^1 含水层, P_1q^2 主要由浅灰、灰、灰白色厚层状细 - 种晶钙白云曾、碎裂粗粒白云层夹云质虎斑状泥晶灰岩、灰色厚层状晶生物藻砂屑灰岩为主, 孔隙度较大, 储水能力较强, P_1q^1 主要由灰色铝土质泥岩、页岩夹黄色中层状细粒石英砂岩, 在其南部地区即靠近青龙洞

洞口区域夹有碳质泥岩或劣煤透镜体；黄龙洞的泉水附近的岩层以 D 和 C 为主，但由于断层的存在，D 对泉水的影响并不显著，由图 2 可知，该洞穴的泉水主要来自于 C_{2w} 含水层，C_{2w} 主要由灰、浅灰色中-厚层泥状、淀晶粒灰岩、有孔虫藻屑灰岩为主，同样具有较强的储水性。青龙洞泉水口附近岩层厚度均较低，为 20~30 cm 之间。

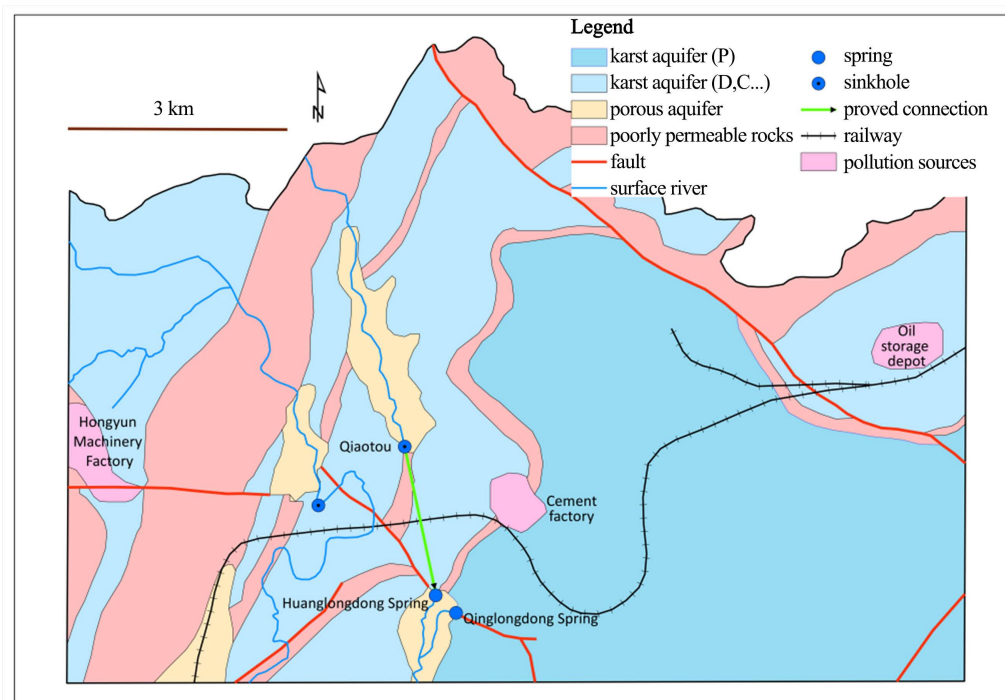


Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区概况

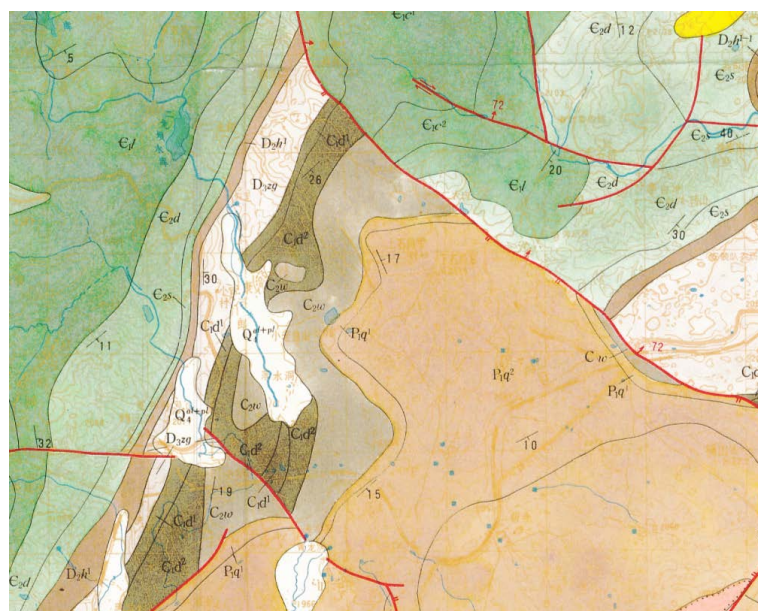


Figure 2. Geological map
图 2. 地质图

3. 数据来源及数据方法

3.1. 数据的采集与监测

在青龙洞泉水口安置 HOB0U24-001 水文监测计, 每 15 min 自动监测保存电导率(EC)、水压(Pressure)、水温(Temperature)、pH 等数据。监测的时间从 2007 年 1 月 29 日至 10 月 8 日, 时间横跨旱雨两季。

3.2. 数据处理与分析

用泉水的水压(Pressure)表示水位, 并将数据按照旱季和雨季进行划分(1~4 月为旱季, 5~10 月为雨季)。分析所采用的水文要素包括水位、水温、电导率、pH, 其中水温、电导率、pH 为水体理化因子。

(1) 通过计算 Pearson 相关系数(r_{xy}) [1] 分析探讨各要素之间的复杂关系, 公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

公式中: \bar{x} 和 \bar{y} 为两参数的平均值; 相关系数 $r_{xy} \in [-1, 1]$, $r_{xy} > 0$ 时为正相关, $r_{xy} < 0$ 时为负相关, r_{xy} 的绝对值越接近于 1, 表明两要素相关性越显著, 反之, 越接近于 0, 表明两要素的相关性越小。

(2) 建立以水位为因变量, 水温、电导率、pH 为自变量的多元回归模型, 以最小二乘法估计自变量的参数, 以探明自变量对因变量的影响, 公式如下:

$$\beta = (X'X)^{-1}X'Y \quad (2)$$

公式中: β 为回归系数, 即模型的参数向量; X 为自变量矩阵, 包含了所有自变量的取值, 行数为样本数, 列数为自变量的个数加 1; Y 为因变量向量, 包含了所有因变量的取值, 行数为样本数; X' 为 X 的转置矩阵; $(X'X)^{-1}$ 为 $X'X$ 的逆矩阵, 是一个方阵, 其行列数等于自变量个数加 1。

(3) 对所建立的线性回归模型进行 t 检验, 以检验自变量与因变量间关系的显著性, 公式如下:

$$t = (\beta - \beta_0) / (s * \text{sqrt}(v)) \quad (3)$$

公式中 β_0 为待检验的值, 通常为 0; s 为残差标准差; v 为自由度, 等于样本容量减去自变量个数减去 1。若 t 的对应 P 值 < 0.05 则自变量与因变量间的相关性显著。

(4) 将各水文要素按旱季和雨季分成 2 组进行方差分析, 以探讨其是否存在季节差异。公式如下:

$$F_r = SSA / (k - 1) / SSE / (n - k) \quad (4)$$

公式中 r 为水文要素的序号; SSA 为组间平方和, 反映了各组均值与整体均值之间的差异; SSE 为组内平方和, 即各组内部方差; k 为组数; n 为样本总数。当 F 对应的 P 值 < 0.05 则相应水文要素的值组间差异显著。

利用 excel 分别计算青龙洞泉水旱季和雨季各水文要素的平均值、最大值、最小值, 利用 R 语言绘制各水文要素旱雨季动态变化图, 利用 R 语言对除了 pH 之外的水文要素进行 $\lg + 1$ 转换, 利用 R 语言进行旱雨两季水文要素间皮尔逊相关系数的计算, 利用 R 语言建立多元线性回归模型并进行多元逐步回归, 利用 R 语言对所建立的线性回归模型进行 t 检验。

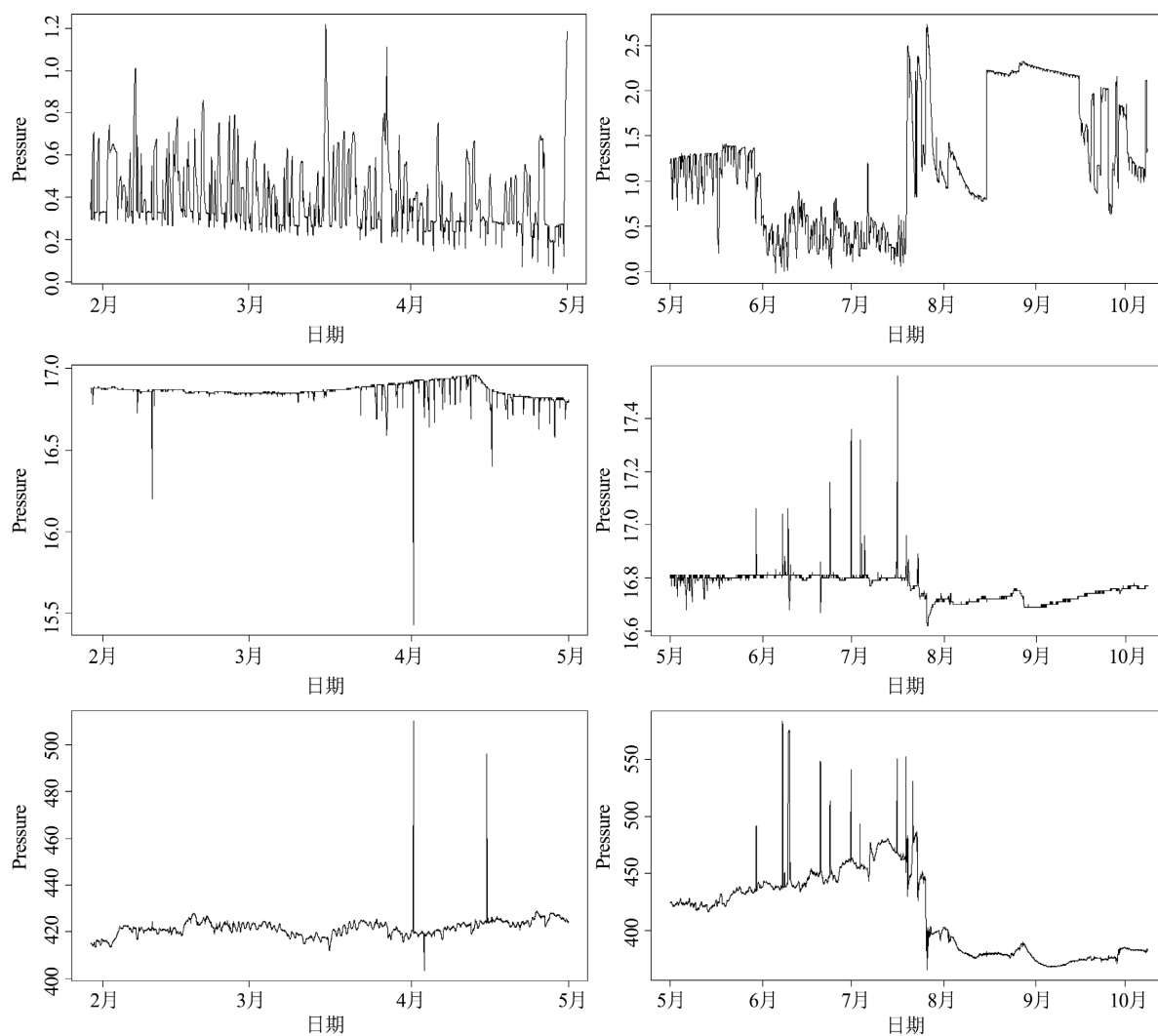
4. 结果与分析

4.1. 水文要素旱雨季动态变化特征

根据统计结果绘出 2007 青龙洞年泉水旱雨季各水文要素动态变化图, 如图 3 所示。本研究表明, 研

究区 2007 年旱季泉水水位范围为在 0.03~1.219 m 之间, 平均水位为 0.3977 m; 雨季泉水水位范围在 -0.017~2.731 之间, 平均水位为 1.202 m。旱季泉水水温范围在 15.43℃~16.96℃之间, 平均温度为 16.86℃; 雨季泉水水温范围在 16.62℃~17.56℃之间, 平均水温为 16.76℃。旱季泉水电导率范围在 403.39~510.28 uS/cm, 平均电导率为 421.54 uS/cm; 雨季泉水电导率范围在 365.58~583.43 uS/cm 之间, 平均电导率为 415.62 uS/cm。旱季泉水 pH 范围在 7.07~7.36 之间, 平均 pH 为 7.21; 雨季泉水 pH 范围在 6.75~8.11 之间, 平均 pH 为 6.93。

由图 3 可知, 研究区 2007 年旱季泉水水位变化较规律, 总体上呈周期性变化; 雨季泉水水位变化则呈现阶段性: 5 月初至 6 月初间泉水水位呈周期性变化, 水位在 0.5~1.5 m 范围内波动; 到 6 月份之后泉水水位总体降低, 水位大体在 0~0.75 m 范围内波动; 到七月旬又大幅度升高并呈周期性变化, 且峰值和最低值差距较大, 水位范围在 0.75~2.7 m 范围内波动; 到 8 月初泉水水位又降低到 1.0 m 左右; 而到了 8 月中旬, 水位大幅度升高并保持稳定到 9 月中旬, 在这期间泉水水位在 2.25 m 左右; 9 月中旬后泉水水位小幅度降低并呈现不规则变化, 水位在 0.5~2.2 m 范围内波动。结合降水数据得出, 各水文要素对降水的响应均较为迅速。同时由图 3 可知其他水体理化因子在变化的过程中均会出现异常值(相比前后的数据大幅度增大或减小), 且各水体理化因子雨季出现异常值的频率均高于旱季。



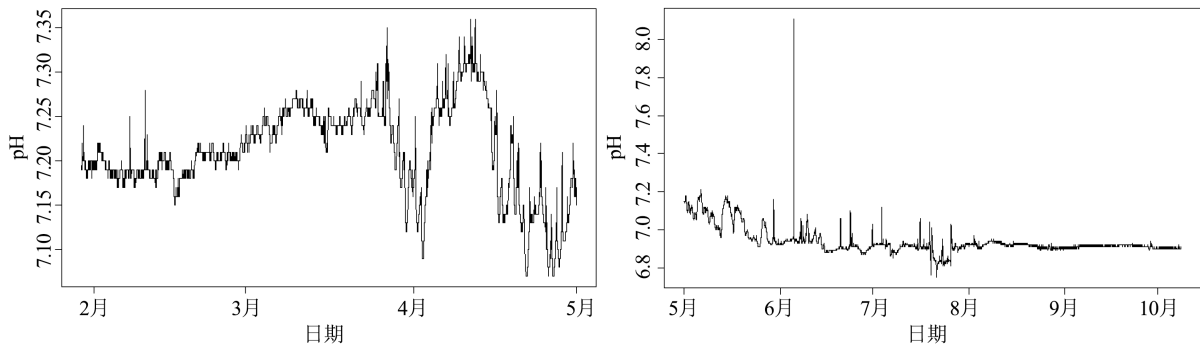


Figure 3. Dynamic changes in hydrological elements of Qinglongdong Spring Water during dry and rainy seasons

图 3. 青龙洞泉水旱雨季水文要素动态变化图

4.2. 旱雨季水文要素间的相互关系

由方差分析结果可知(表 1), 水位、水温、电导率、pH 等四个水文要素的检验 P 值均小于 0.05, 故可知青龙洞泉水的水文要素的值在旱雨季存在明显差异。由皮尔逊相关系数计算得出(表 2), 2007 年旱季青龙洞泉水水位与水温、电导率负正相关, 与 pH 呈正相关; 水温与电导率呈负相关, 与 pH 呈正相关; 电导率与 pH 呈负相关。雨季青龙洞泉水水位与水温、电导率、pH 均呈负相关; 水温与电导率、pH 均呈正相关; 电导率与 pH 呈正相关。

青龙洞旱季各水文要素间的关联性显著低于雨季, 且水文要素间的相互关系随季节变化也存在差异。

Table 1. Seasonal variance analysis of hydrological elements of Qinglongdong Spring Water

表 1. 青龙洞水文要素季节方差分析

	Pressure	Temperature	EC	pH
F	12983	20331	363.5	103492
P	<2E-16***	<2E-16***	<2E-16***	<2E-16***

Table 2. Correlation coefficients of hydrological elements in Qinglongdong Spring Water during dry and rainy seasons

表 2. 青龙洞泉水旱雨季各水文要素的相关系数

旱季	Pressure	Temperature	EC	pH
Pressure	1	-0.01518374	-0.08995041	0.04022278
Temperature		1	-0.45684148	0.26588784
EC			1	-0.21103278
pH				1
雨季	Pressure	Temperature	EC	pH
Pressure	1			
Temperature	-0.60304908	1		
EC	-0.71471	0.7040752	1	
pH	-0.06875297	0.294839	0.1118088	1

4.3. 旱雨季泉水水位与水体理化因子的关系

根据所建立的多元回归模型以及逐步回归结果(表 3), 研究区泉水旱雨两季的最佳多元回归模型均

为: 水位 = 水温 + 电导率 + pH + 常数。模型的 t 检验结果如表 4 所示, 由检验结果可知, 旱雨两季各水体理化因子的检验 P 结果均小于 0.05, 说明其与水位均有显著相关关系。且总体的检验 P 值也均小于 0.05, 模型有效。

由多元逐步回归结果可知, 2007 年旱季青龙洞泉水水位与水体理化因子的关系方程为: 水位 = $-0.269406 \times \text{水温} - 0.005085 \times \text{电导率} + 0.118599 \times \text{pH} + 6.229476$, 由方程可知对旱季青龙洞泉水水位影响最大的水体理化因子为水温, 且与水位呈负相关。雨季青龙洞泉水水位与水体理化因子的关系方程为: 水位 = $-3.396041 \times \text{水温} - 0.009649 \times \text{电导率} + 0.141939 \times \text{pH} + 61.163264$, 由方程可知对雨季青龙洞泉水水位影响最大的水体理化因子也为水温, 且与水位呈负相关。

旱季和雨季青龙洞泉水水位变化的主要影响因子均为水温, 但雨季水温对水位的影响显著高于旱季; 电导率和 pH 在旱季和雨季对水位的影响相似。

Table 3. Results of stepwise multiple regression of water level and physicochemical factors in Qinglongdong Spring Water during dry and rainy seasons

表 3. 青龙洞泉水旱雨两季水位与水体理化因子多元逐步回归结果

	Temperature	EC	pH	常数
旱季	-0.269406	-0.005085	0.118599	6.229476
雨季	-3.396041	-0.009649	0.141939	61.163264

Table 4. Results of t-test for stepwise multiple regression model

表 4. 多元逐步回归模型 t 检验结果

t 检验	Temperature		EC		pH		常数		模型
	t value	P	t value	P	t value	P	t value	P	P
旱季	-7.396	1.54e-13***	-9.686	<2E-16***	3.467	0.00053***	8.360	<2E-16***	<2E-16
雨季	-30.060	<2E-16***	-65.124	<2E-16***	2.3522	0.0187*	34.643	<2E-16***	<2E-16

5. 讨论

由图 3 可知, 各水文要素在变化的过程中会出现异常值, 如雨季 6 月份存在 pH 突然出现较大变化后又回复正常, 可能是青龙洞区域人为活动较强, 对水体理化性质产生扰动; 但由于地下水的流动性和溶解性, 所以很快便恢复正常。且各水体理化因子雨季出现异常值的次数显著高于旱季, 这可能是由于雨季降水作用影响, 地表水流动速度加快, 对污染源的运输作用加剧。

本研究得出 2007 青龙洞泉水各水文要素对降水的响应迅速。地质分析可知地表河流对泉水水位有补给作用, 刘剑宇[2]等研究表明地表河流径流量受到降水影响较大, 同时地质分析得出青龙洞泉水附近岩层厚度较低, 地表水渗透较快, 上述二者共同作用可能导致了研究区泉水水文要素对降水的快速响应。

由统计分析结果可知, 2007 年青龙洞泉水旱季水位变化和雨季水位变化存在较大差异: 旱季变化较规律, 而雨季则呈阶段性变化; 且雨季水位显著高于旱季, 这可能是由于雨季降雨增多, 地下水补给增加, 导致泉水水位上升(陈思嘉, 2018) [3], 同时黄毅[4]等研究表明季节性水文过程, 如水体理化因子的含量的变化、蒸发等因素也会影响泉水水位变化, 本研究方差分析结果显示水温、电导率、pH 等水体理化因子的含量在旱雨季存在显著差异, 故这可能是青龙洞泉水旱雨季水位变化存在较大差异的原因。

泉水水文要素间相互关系受到水文循环、地质构造、人类活动等多个因素的综合影响。陈慧(2009) [5], 魏群等[6]研究表明在季节变化的过程中, 降雨量、蒸发量、地下水补给、温度等因素都可能会影响水位、水温、pH 值和电导率等水文要素, 并存在着相互作用和反馈。这可以为本研究得出的旱雨两季泉水水文

要素的相互关系存在差异提供合理解释。

回归分析结果表明研究区泉水旱雨季水位的主要水体理化影响因子均为水温, 水温通过影响泉水出口的开度(孟凯, 2010) [7]、地下水的流动速度和方向(陈双林, 2016) [8]、地下水的溶解和运输能力(贾永光, 2008) [9]来影响泉水水位, 故可知上述因素对研究区水位有较大影响。且由于旱雨季水位差异较大, 可知青龙洞泉水的开度, 地下水的流速和方向, 地下水的溶解和运输能力在旱季和雨季可能有较大差异。

6. 结论

(1) 由地质和自然环境分析可知, 青龙洞泉水的含水层为 P_1q^2 和 P_1q^1 , 两类岩层均具有较强的储水能力; 青龙洞地区受人为活动影响较强。

(2) 2007 年青龙洞泉水各水体理化因子的值在变化过程中均会出现异常值, 且雨季的频率高于旱季。

(3) 由统计分析结果可知, 2007 年青龙洞泉雨季泉水水位显著高于旱季。

(4) 由折线图可知, 2007 年青龙洞泉水水位旱雨两季变化存在差异, 旱季更规律, 变化呈周期性, 而雨季泉水变化则呈阶段性。

(5) 由方差分析结果得出 2007 年青龙洞泉水水文要素的值在旱季和雨季存在显著差异。

(6) 由皮尔逊相关分析结果得出 2007 年青龙洞泉水水文要素间的相互关系存在一定的季节差异, 且旱季水文要素间的关联性显著低于雨季。

(7) 由多元逐步回归结果可知水温是影响 2007 年青龙洞泉水旱雨两季水位的主要水体理化因子, 且在旱季和雨季均与水位呈负相关。

2007 年青龙洞泉水各水文要素的含量, 变化规律在旱雨季均存在较大差异, 且青龙洞泉水的水位在旱雨季均主要受水温影响。

参考文献

- [1] 毛龙富, 刘宏, 周恩民, 易琦, 党翠翠, 杨丽瑞, 付舒, 张净净. 岩溶关键带年内水文动态变化规律[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 116-124.
- [2] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 顾西辉. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1875-1885.
- [3] 陈思嘉, 刘国彬, 巫博文. 茅台石窟旅游景区地下水年际变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 1-7.
- [4] 黄毅, 刘伟, 李强. 长江上游地区的季节性水文过程及其影响[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(4): 68-72.
- [5] 陈慧, 张拥军. 岩溶泉水温、PH 值和电导率的季节变化[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(4): 920-925.
- [6] 魏群, 范东元. 华北地区泉水水位、水温与水化学特征变化分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 21-22.
- [7] 孟凯, 周贵民, 等. 泉水水位的变化及其影响因素研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(1): 63-71.
- [8] 陈双林, 马克平, 等. 水温变化对温泉水位的影响[J]. 水能利用, 2016, 34(12): 46-49.
- [9] 贾永光, 王志华, 等. 温泉水位变化的影响因素分析[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 100-104.