

刘馨泽, 张清明, 孙东, 等. 黄龙核心景区水环境动态特征及钙华沉积能力分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1149-1160.
DOI: 10.11932/karst20230602

黄龙核心景区水环境动态特征及钙华沉积能力分析

刘馨泽¹, 张清明², 孙东¹, 唐淑², 田长宝², 黄何平², 周亚萍¹,
熊雨霞¹, 梁馨予¹, 范家君¹, 范鸣¹, 陈洪伟¹

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川 成都 610081;

2. 黄龙国家级风景名胜区管理局, 四川 松潘 623300)

摘要:为有效地评估四川黄龙核心景区水体水化学环境、钙华沉积能力, 及时掌握景区水体水化学场的变化特征, 采用野外实地调查、水质监测等方法, 分析转花池泉群的水环境特征, 黄龙核心景区的钙华沉积能力及其水环境状况。研究结果表明: ①转花池泉群是提供区内钙华沉积的主要钙源和碳源, 与黄龙后沟地表水一同构成驱动区内钙华景观发育演化的水源; 黄龙沟和转花池泉群的水量补给来源主体分别为降雨和冰雪融水。②1999年以来, 转花池泉群流量总体稳中有增, 水质极为稳定, 近30年来历史最大水量出现在2020年, 1999—2017年转花池多年日平均水量为 $7\,817\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 2018—2020年多年日平均流量为 $9\,368\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。③2018年转花池一带出现线状TOC异常带, 主要原因是黄龙沟上游三道坪至头道坪一带的放牧活动造成钙华沉积速率下降, 因此, 建议加强对钙华源泉涵养区的保护, 减少放牧活动对其的影响。④区内各水循环段的景观水仍具备一定的沉积能力, 2019年SiC值下降, 与强降雨的稀释作用有关, 从而降低了钙华沉积能力。

关键词:水环境特征; 钙华沉积能力; 黄龙景区; 水质监测

中图分类号: P931.5 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)06-1149-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

黄龙景区位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县东部, 以钙华沉积地貌及附属的水体景观为主要特色, 为典型的高原冷水钙华景观区, 是著名的世界自然遗产地。黄龙钙华的形成是由于地球深部高分压的 CO_2 在碳酸盐岩补给区产生富含碳酸氢钙的地下水, 因碳酸钙过饱和而发生沉积^[1-3]。钙华景观周边被密集的林区和黑化彩池群所包围。近年来, 黄

龙景区受人类活动影响, 景区水环境质量出现变差的趋势^[1], 钙华水体景观的部分地段出现了黑化、沙化、水体漏失增强等问题^[4], 对景区的景观品质和可持续开发产生了一定的不利影响, 部分专家认为黄龙钙华景观现状稳定性较好, 但正处于缓慢的、反复的衰退过程^[5]。因此, 解决这一系列问题, 对黄龙景区水体的水质监测和水环境特征分析尤为重要。

水是地表钙华沉积必备的条件之一, 水在钙华沉积中充当着所需各种离子的载体, 也为参与钙华

资助项目: 四川省阿坝州黄龙国家级地质公园水循环特征及景观保育技术研究(5132202018000229); 黄龙国家级风景名胜区管理局黄龙沟藻类治理项目(51322020100254); 黄龙国家地质公园钙华景观自然修复保育示范研究(第一阶段工作)(513220202100331); 黄龙钙华世界遗产自然修复和保护技术研究(SDDY-Z2022008); 青藏高原东缘典型钙华沉积水动力控制过程研究(SCIGS-CYBXM-2023004)

第一作者简介: 刘馨泽(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事生态环境修复研究工作。E-mail: cliu_7411@163.com。

通信作者: 张清明(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事钙华环境保护研究工作。E-mail: 550102348@qq.com。

收稿日期: 2022-10-14

沉积的各种生物提供适合的生境^[6-10],水动力条件、水文地球化学特征、藻类活动等影响钙华的形成和演化^[11]。袁道先院士、刘再华研究员等^[12-13]工作开展较早,研究了碳循环及与其相耦联的水循环、钙循环系统碳酸盐岩被溶蚀或沉积的岩溶作用,对钙华来源、沉积机制和沉积过程的影响因素进行了全面的研究,奠定了黄龙钙华地质研究的基础。关于黄龙地区的区域地质调查、水资源及环境地质监测等方面的研究,四川地矿局、四川省地质环境监测总站等单位开展了一系列的调查并取得了相应的成果^[5,14-15]。黄龙景区管理局科研处自 1999 年至今,持续开展了黄龙景区水循环系统部分成分的监测。董发勤等^[8]提出黄龙水体中有大量藻类和细菌,诱导钙华沉积。王海静等^[16]发现夏季降雨的稀释作用不但影响了水化学指标含量,同时也影响了水及其沉积的钙华的稳定同位素组成。

前人针对黄龙景区进行了较为系统的钙华沉积规律研究以及水环境监测工作,但对景区水体水化学数据序列掌握时间较短,并未做更为深入的分析与研究。因此,本文就黄龙核心景区内转花池至涪江全部的水质监测、水环境特征及钙华沉积能力进行分析,以达到及时掌握钙华自然修复过程中水化学场的变化,从而为后续景观保育提供相应支撑。

1 研究区概况

黄龙景区为著名的世界自然遗产地之一,地处中国川西高原松潘县境内,因多姿多彩的钙华景观而闻名,景区拥有富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的地下水,出露地表后经过一系列理化变化后沉积形成规模宏大的钙华景观^[4]。黄龙核心景区转花池至涪江段为钙华沉积段,长度 3.6 km,宽度 100~200 m,其底部为更新统冰水沉积泥砾层、两侧为三叠系、志留系砂板岩,均为相对隔水边界^[15,17]。

黄龙沟上游为大面积分布的碳酸盐岩山区,黄龙沟地表水流域面积 18.5 km^2 ,水源起于雪宝顶一带的冰雪融水,由南向北径流,望乡台一带的转花池泉水汇入溪沟,流经景区,以渗漏—排泄模式形成多处二次转化泉,构成 4 个主要局部水循环段,最终以下降泉群形式汇入北侧的涪江^[17]。因地表钙华松散沉积,地表水多有渗漏,黄龙沟水量变化较大,冬季基本无水(沟口有泉水流入涪江),黄龙后沟地表水水

量为转花池泉群的 4~8 倍,为景观水主要的“水源”。地下水上升在转花池内形成断层上升泉群,内有 6 个泉口,为全区景观水主要的“钙源和碳源”^[17]。转花池泉群出露受望乡台断裂控制,望乡台以南至玉翠峰、雪宝顶一带为连片分布的石炭系、泥盆系、二叠系碳酸盐岩山区,冰雪融水、降雨入渗补给充沛。形成黄龙钙华的以转花池泉群为首的上升泉群为钙华源泉,由 6 个泉点组成,出露高程 3 568~3 582 m,呈东西向近线性展布,无论是产出条件、水量还是水化学特征,均表明其为经一定深度循环的碳酸盐岩岩溶地下水。按照松潘一带的平均地温梯度($2 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$)、转花池泉群年平均气温 $6.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、地面平均气温 $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行估算,泉水循环深度至少在 185 m 以上,考虑到变温带的影响,可能大于 200 m。

黄龙地区属于高原寒温带—亚寒带季风气候区,景区内降水量主要集中于 5—10 月份,2007—2019 年多年平均降水量为 842.2 mm,2019、2020 年降水量明显增加,至 2020 年年降水量已达 1 097.5 mm,为近 30 年历史最高水平。

2 研究手段和方法

2.1 监测站点设置

研究区为整个黄龙核心景区,设置了 14 个监测点,覆盖了研究区内与水循环相关的全部大型泉群和泉点及地表水点(表 1)。其中,望乡台断层出露的转花池泉群(共 6 个泉口)和黄龙沟地表水以东的泉群、控制区内水循环的 5 处大型二次转化泉群(接仙桥大泉、玉液泉、隐芳泉、含羞泉、龙泉眼)。为保证数据质量,针对不稳定的指标进行现场测定,pH、温度、电导率利用手持式 WTW 3310 pH 计测量, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 利用滴定法现场测量,其余水质测试指标现场采用固定剂固定后送交成都进行测试。

2.2 研究方法

为研究黄龙核心景区内的水化学特征,采取现场测试与室内分析相结合,定期进行区内的流量和水质监测,其中,现场监测项目包括流量、pH 值、温度、电导率、游离 CO_2 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 等 7 项,实验室监测主要包括磷酸盐、氯化物、硫酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、铵离子、钾、钠、镁、钙等 10 项。用于室内测试的样品参照水质分析监测规范将样品按照不同的

表 1 监测站点一览表
Table 1 List of monitoring sites

序号	监测站编号	监测对象	流量监测类型	水体类型	监测站与监测对象关系	位置
1	806	转花池1号泉	矩形堰	地下水	泉口下游河道	转花池
2	801	转花池2号泉	三角堰	地下水	泉口	
3	808	转花池3号和5号泉	矩形堰	地下水	泉口下游河道	
4	802	转花池4号泉	三角堰	地下水	泉口	
5	803	转花池6号泉	三角堰	地下水	泉口	
6	804	黄龙后沟地表水	矩形堰	地表水	溪流	核心景区上游
7	1205	黄龙沟东坡泉群	矩形堰	地下水	泉群下游坡脚	
8	812	接仙桥大泉	矩形堰	地下水	泉口下游河道	核心景区中游
9	811	玉液泉	矩形堰	混合水	泉口	
10	814	含羞泉	矩形堰	地下水	泉口	
11	2402	隐芳泉	矩形堰	混合水	泉口下游	
12	816	龙泉眼	矩形堰	混合水	泉口	核心景区下游
13	1602	涪源桥桥下涪江溪水	流速仪	地表水	溪流	
14	701	四号停车场旁涪江溪水	流速仪	混合水	溪流	

要求进行预处理和保存,分析方法则采用实验室常规分析方法。

本研究使用的降雨、水量数据分为二部分,一部分为 2018 年以前的由黄龙科研处提供,另一部分为 2018 年以后数据,为笔者所在科研团队长期监测获得。

3 结果和分析

3.1 转花池泉群水环境特征分析

该区域水文地质、地层岩性及地质构造特点和水均衡计算均表明,黄龙钙华源泉地下水的补给区为望乡台断裂以上,夹持于坛子沟断裂与弧形的望乡台断裂之间广大的碳酸盐岩分布区域。该区域地势高耸,面积为 58.3 km²,为望乡台以上黄龙后沟流域面积(11.77 km²)的 5 倍。相关研究表明,补给区广泛分布泥盆系至二叠系碳酸盐岩,因构造作用强烈,岩石破碎,节理、裂隙及溶隙发育,有利于大气降水的入参与汇流,并在一定条件下向深部运移,在望乡台断裂过黄龙沟底的低势点受断裂下盘三叠系砂、板岩阻隔而以上升泉群的形式出露。泉群总体夏季变化大,冬季变化小,表明夏季受到上覆浅层冰碛层融化与地下水的一定混合,这一特点已为多年水同位素测定结果所证实。泉群流量变化与大气降水基本一致,但响应略有滞后,滞后时间在 1 个月左右。

转花池泉群以高二氧化碳分压、高重碳酸盐、高钙为主要特征,提供区内钙华沉积的主要钙源和碳

源,与黄龙后沟地表水一同构成驱动区内钙华景观发育演化的水源^[17-18]。

3.1.1 水量动态

根据 2018—2020 年监测数据(4 月—11 月监测期)显示,转花池泉群平均流量最小 4 035.65 m³·d⁻¹(4 月),最大为 13 971.99 m³·d⁻¹(9 月)。2018 年日平均流量 8 741 m³·d⁻¹(估算),2019 年日平均流量 9 365.85 m³·d⁻¹,2020 年日平均流量 9 998.09 m³·d⁻¹,2018—2020 年多年日平均流量为 9 368 m³·d⁻¹。总体来说,2020 年转花池流量高于 2019 年,与该年度降雨极为丰沛有关。2007—2018 年多年平均降水量为 817 mm,2019—2021 年多年平均降雨量为 965 mm,总体处于降雨相对增强的年份。2019 年年降水量为 917.5 mm,2020 年年降雨量 1 097.5 mm,2021 年年降水量为 880.5 mm,降雨量最大为 2020 年。从年降水量来看,2020 年度已经达到 2007 年以来的历史最高水平,比 2007—2019 多年平均降水量(842.2 mm)高出 255 mm,比 2019 年年降水高出 180 mm。似 2020 年降雨量水平亦不会再继续大幅增加,故而,2020 年转花池泉群日平均流量已经达最大程度。2021 年年降雨量相对 2019 年骤降 217 mm,对转花池的流量动态造成了一定不利影响。

以 6—9 月丰水期流量评估,2018—2020 年季度转花池泉群的同期平均流量保持较为稳定状态,呈现略有增加的趋势,其值分别为 9 768.62 m³·d⁻¹、

1.08 万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 、1.12 万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 以 2020 年流量水平为峰值, 后因降雨量降低, 流量平均水平出现缓慢下降。此种情况因 2021、2022 年降雨量连续下降, 已经出现此类状况, 尤其是 2022 年夏季出现的连续高温少雨甚至无雨, 进一步强化了这种趋势, 2023 年 1—2 月枯水期, 与往年相比, 受转花池涵养的五彩池因暂时性水量减少出现“冰池”向上游推移的现象。

黄龙景区每年 4—11 月降水量占全年总量 90% 以上, 如 2008 年占比为 91%, 2015 年为 98%, 2020 年占比为 92%。故以 4—11 月区间内的日平均水量, 评估多年以来转花池总流量(转花池 1 号至 6 号泉)

变化。

图 1 为 1999—2017 年转花池水量动态图, 由该图可知, 1999 年—2017 年 19 年时间内, 转花池日平均水量在 $7\,817 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 最大值为 $9\,407 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (2012 年, 与 2019 年水平相当), 最小值为 $6\,807 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (2001 年), 日平均水量年际变幅约 $\pm 1\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 总体维持平稳。1999—2012 年日平均水量呈现缓慢增长趋势, 2012 年以后缓慢下降, 结合前述分析, 至 2019—2020 年又形成新的峰值, 目前来看, 2021 年以来处于缓慢下降阶段。

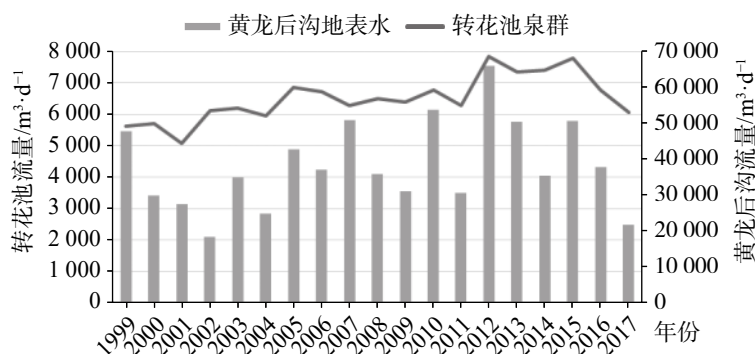


图 1 转花池水量动态(1999-2017 年)

Fig. 1 Water flow dynamics of Zhuanhuachi springs (1999-2017)

与黄龙后沟的水量动态相比, 转花池的水量动态变化较平稳, 黄龙沟地表水年际动态变化大, 但其变化趋势与转花池有着一致性。黄龙后沟(804 监测站)1999—2017 多年日平均水量为 $38\,843 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 最大值为 $67\,081 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (2012 年), 最小值为 $18\,559 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (2002 年), 与转花池的动态变化相一致。

总体来看, 自 1999 年至 2020 年以来, 转花池水量总体处于稳中有增的状态, 且 2020 年水量已经增长至历史最大值, 2021 年开始又出现缓慢下降趋势。2012 年至 2020 年为转花池水量一个较为完整的变化周期, 即水量均达到峰值, 但 2012 年以前这种周期性并不明显。

3.1.2 转花池水量动态和黄龙沟地表水关系

据 2019 年监测数据, 转花泉 6 月上旬以前流量稳定持续增长(图 2), 由 4 月 10 日的 $4\,035.65 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 增长到自 6 月 10 日的 $9\,601 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 呈线性增长, 期间未有起伏, 中旬以后流量保持稳定, 基本维持在 $11\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 上下。

图 3 为 2019 年 6—12 月降水分布图, 其中, 通过图 2 与图 3 相比较可知, 转花泉流量的变化与降雨动态并不一致, 而其流量变化与冰雪融水的溶解时间有着较好的一致性, 这说明泉群的水量补给来源主体为冰雪融水。

图 4 为 2019 年黄龙沟水量、转花池流量历时曲线图, 由图 3 和图 4 可知, 同期的黄龙沟水量动态完全和降雨一致, 8 月份雨量减少, 7 月份降雨量为 106.5 mm , 8 月份为 88.5 mm , 9 月份为 160.5 mm , 黄龙沟的水量在 8 月份有明显衰减。9 月份降雨量增加后, 黄龙沟水量又有明显增加。转花泉流量则保持稳定, 没有明显变化, 仅 9 月 20 日日降雨量达到 32.5 mm 后, 有明显变化。进一步验证了黄龙沟是降雨动态型, 转花池则主要是冰雪溶水动态型, 降雨对其的流量变化影响较小, 但转花池的水量可能有上游黄龙沟入渗补给的部分。

3.1.3 水质动态

转花池泉水以高二氧化碳分压、高碳酸氢根、高

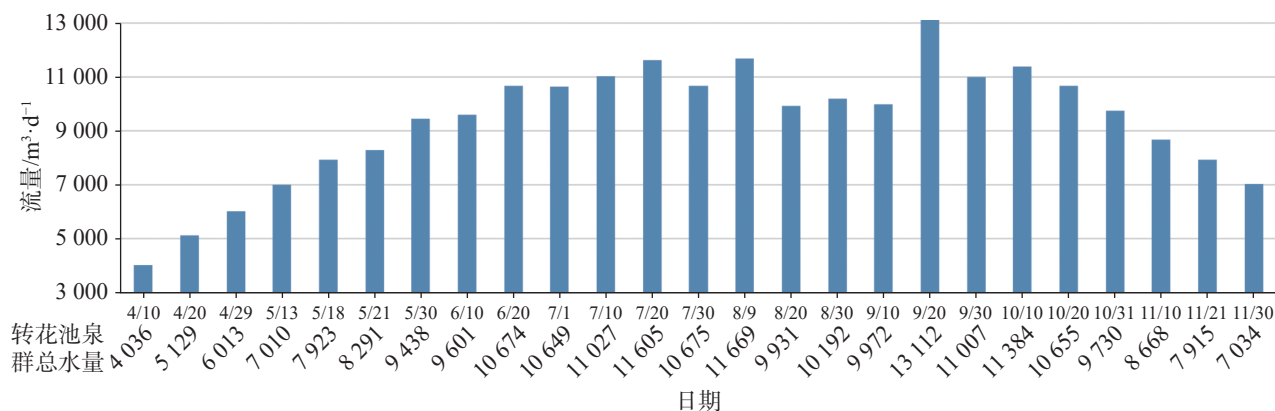


图 2 转花池泉群流量历时曲线

Fig. 2 Flow duration curve of Zhuanhuachi springs

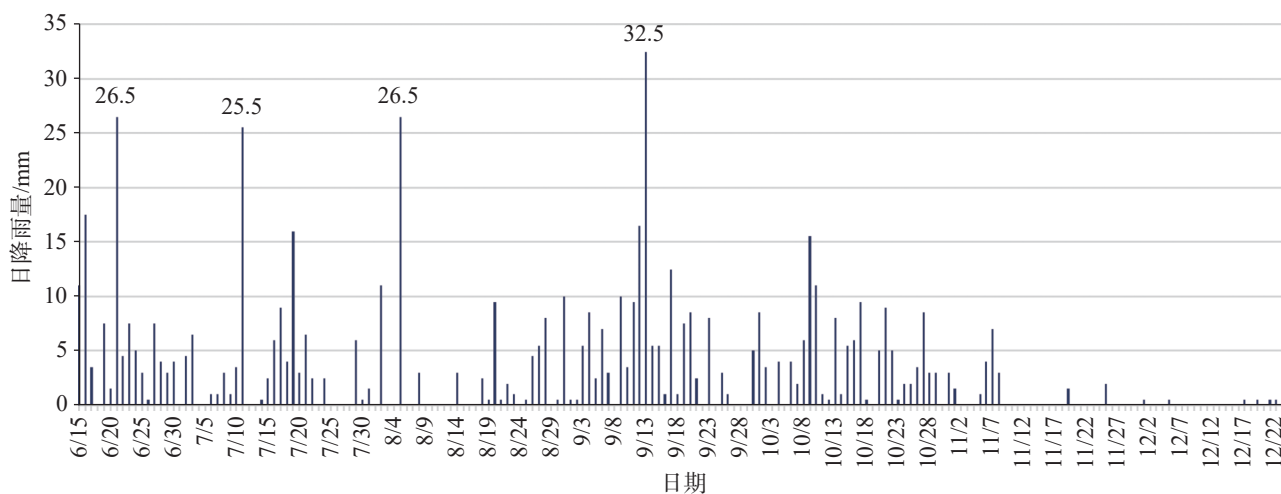


图 3 2019 年 6-12 月降水分布图

Fig. 3 Precipitation distribution from June to December, 2019

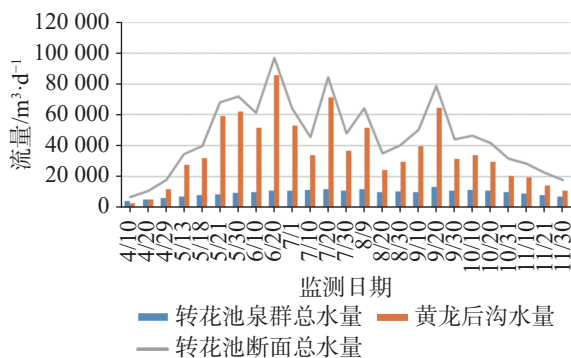


图 4 2019 年黄龙沟水量、转花池流量历时曲线图

Fig. 4 The flow duration curve of Huanglong valley and Zhuanhuachi springs in 2019

钙为主要特征。据 2018 年 9 月—2020 年 10 月多期水质监测数据可知(表 2), 水质动态保持稳定。pH 为 6.4~6.7(平均值为 6.6), 温度为 6.2~7.2 ℃(平均值为 6.7 ℃); 碳酸氢根浓度 715~899 mg·L⁻¹(平均值为 799 mg·L⁻¹), 钙离子浓度 175~248 mg·L⁻¹(平均值

208 mg·L⁻¹)。水中二氧化碳分压 P_{CO_2} 为普遍为 10~20 kPa, 最大可接近 30 kPa, 方解石饱和指数 -0.83~0.15, 普遍处于未饱和状态。

综合前述转花池泉群流量动态及本节来看, 转花池泉群流量总体稳中有增(2020 年已达最大值), 水质极为稳定。

3.2 黄龙核心景区水环境状况

已有相关研究结果表明, 水中溶解的有机碳会附着在钙华表面, 通过占据钙华沉积的活性晶格位点, 阻碍钙华的正常沉积^[19]。也就是说, TOC 值增加是导致钙华沉积能力下降的一个重要原因。

通过采样监测发现, 在研究区内, 磷酸盐(检出限 0.051)、亚硝酸盐(检出限 0.016)、铵根(检出限 0.02)均低于检出限, 硫酸盐、硝酸盐、氯化物均在地下水质量 I 类标准内。此外, 图 5 为 2018 年 9 月 10 日、9 月 29 日、10 月 9 日所监测的总有机碳含量

表 2 转花池泉水水质动态
Table 2 Water quality dynamics of Zhuanhuaachi springs

野外监测 (年/月/日)	pH	水温 t/℃	电导率 μs·cm ⁻¹	[Ca ²⁺] mg·L ⁻¹	[HCO ₃ ⁻] mg·L ⁻¹	P _{CO₂} kPa	SIc
2018/9/10	6.7	6.8	1 078	248	746	10.25	0.15
2018/9/29	6.7	6.8	1 091	224	746	10.28	0.12
2018/10/21	6.6	6.7	1 093	/	746	15.00	-0.83
2019/4/20	6.5	6.2	1 163	228	715	18.09	-0.17
2019/5/21	6.6	6.3	/	188	873	15.00	0.01
2019/6/20	6.6	6.5	/	192	899	17.28	-0.02
2019/7/20	6.4	7.2	1 144	202	831	26.70	-0.24
2019/9/20	6.5	6.8	1 101	182	746	16.40	-0.16
2020/6/5	6.4	6.7	1 203	175	856	12.80	0.04
2020/7/20	6.6	7	1 182	211	823	15.30	0
2020/10/20	6.7	6.5	1 114	227	812	11.90	0.11

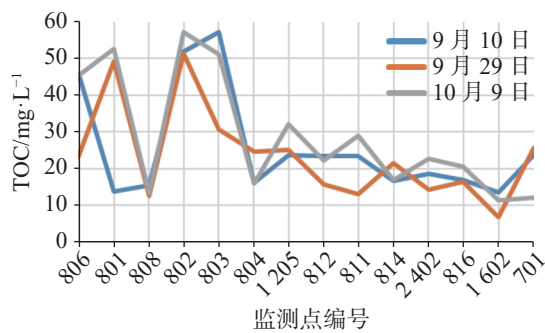


图 5 2018 年总有机碳含量与监测点关系图

Fig. 5 Relationship between total organic carbon content and that at each monitoring site in 2018

与监测点关系图,由图可知,2018 年指标偏高的总有机碳 (TOC) 在转花池一带出现明显的异常。

表 3 为 2018 年总有机碳 (TOC) 的测试结果。由表 2 可知,2018 年度研究区内 TOC 值平均浓度为 25 mg·L⁻¹,异常明显的主要有 4 个监测点,即 806 点 (转花池 1 号泉)、801 点 (转花池 2 号泉)、802 点 (转花池 4 号泉)、803 点 (转花池 6 号泉),泉口均监测出此类异常,异常值范围为 38~57 mg·L⁻¹,以 802 号点最有代表性。

由此可以得出,转花池一带的 TOC 出现明显的异常高值,且从 2018 年 9 月 10 日至 10 月 9 日三次的监测结果看,转花池 4 号泉的 TOC 值均是全区最高的,其 TOC 值最大可达 57 mg·L⁻¹。2019 年,通过采集井内地下水样、地表水、泉水等样品进行检测,其 TOC 值普遍下降至 2 mg·L⁻¹ 左右,仅为 2018 年的 10%,TOC 异常消失。这一现象的原因可能与

2019 年度开始大规模强降雨有关,使得原有的异常被大量的水体稀释后消失。此外,造成 2018 年出现 TOC 值增加的另一个重要原因,则是来自黄龙沟上游三道坪至二道坪一带的放牧活动,牛群产生的粪便含有大量有机碳 (一般含量在 15% 左右),在降雨淋滤的作用下溶于水,随着水循环进入地下水,运移至转花池一带,污染了泉群,造成钙华沉积速率下降。转花池 4 号泉、6 号泉所在的位置应该是上游受污染地下水的主径流带。

图 6 为 2018 年各监测点 TOC 值平均浓度,由该图可知,黄龙沟东坡泉群 (1205 点) 存在轻微异常,TOC 仅为 26.9 mg·L⁻¹,黄龙沟地表水 (804 点) TOC 值在平均值以下,为 18.87 mg·L⁻¹,该现象表明上游的放牧活动对地表水影响轻微,主要影响黄龙核心景区地下水,以转花池为甚,且这种影响是持续性的。

转花池以南为连续分布的三级冰碛堆积台地,地势不断增加,总长约 1.7 km,顶面平缓,主要物质为碎块石夹黏土。以黄龙沟沟水为主流,两侧密集分布细小支流。逢遇较大降雨,台地顶面变成连片沼泽地,尤以二道坪为甚。冰碛台地上草甸、乔木丛接连相间,均为每年当地村民放牧活动的主要活动地带,放牧活动不仅局限于沟道底部,沟道两侧山坡乃至近分水岭部位均有放牧活动,主要活动范围东西向宽度一般为 0.6~1.3 km。大量牛粪积聚于沟道及两侧岸坡草甸之上,提供了大量有机质,在降雨淋滤、地表溪流冲刷的作用下,缓慢进入冰碛台地下部碎石层中的地下水内,由南向北径流,至转花池一带

表 3 总有机碳 (TOC) 测试结果 (2018 年)
Table 3 Test results of total organic carbon (TOC) in 2018

编号	位置	SIc		TOC/mg·L ⁻¹		
		9月10日	9月29日	9月10日	9月29日	10月9日
806	转花池1号泉	0.34	0.08	45.7	23.5	45.3
801	转花池2号泉	0.23	0.09	13.8	49.2	52.6
808	转花池3号和5号泉	0.17	0.09	15.4	12.6	13.4
802	转花池4号泉	0.11	0.18	51.7	51.4	57.0
803	转花池6号泉	0.12	0.08	57.0	30.7	51.0
804	黄龙后沟地表水	0.19	-0.13	16.2	24.5	15.9
1205	黄龙沟东坡泉群	0.64	0.47	23.7	25.0	32.0
812	接仙桥大泉	0.87	0.64	23.4	15.7	22.3
811	玉液泉	0.29	0.24	23.4	13.0	29.0
814	含羞泉	0.52	0.76	16.6	21.4	17.0
2402	隐芳泉	0.82	0.46	18.7	14.3	22.8
816	龙泉眼	0.70	0.61	17.0	16.4	20.5
1602	涪源桥桥下溪水	0.87	0.57	13.5	6.8	11.4
701	四号停车场旁溪水	0.99	0.62	23.6	25.5	12.2

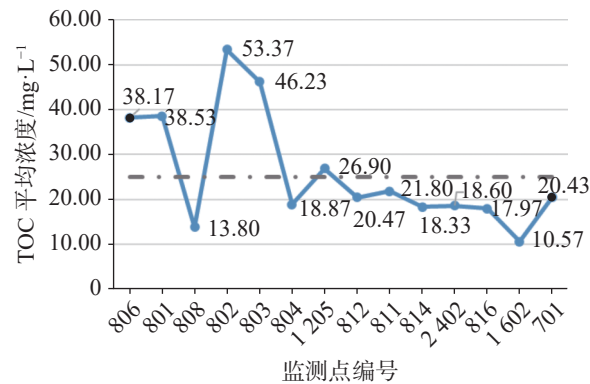


图 6 各监测点 TOC 平均浓度(2018 年)
Fig. 6 Average concentration of TOC at each monitoring site in 2018

与沿着望乡台断层的上升水流在冰碛碎石层内汇合后,造成水中 TOC 升高,于地表形成泉群后这种异常便被监测到。因黄龙沟西侧转花池内的 6 处泉口(转花池 1~6 号泉)和黄龙沟东坡泉群同源,均为受望乡台断层控制的上升泉,故在转花池多处泉口至黄龙沟东坡泉群的范围出现了线状 TOC 异常带,横贯黄龙沟。

3.3 黄龙核心景区钙华沉积能力

3.3.1 丰水期钙华沉积环境

以 2019 年 7 月为典型月,代表丰水期水样,选取了 pH、温度(℃)、钙(mg·L⁻¹)、镁(mg·L⁻¹)、钠

(mg·L⁻¹)、钾(mg·L⁻¹)、氯化物(mg·L⁻¹)、HCO₃⁻(mg·L⁻¹)、硫酸盐(mg·L⁻¹)、硝酸盐(mg·L⁻¹)共计 10 个指标,利用 PhreeQC 软件计算方解石饱和度(SIc)和二氧化碳分压 P_{CO₂},用以评估水体钙华沉积的能力。钙华的沉积主要起因于水中 CO₂ 的大量释放,造成溪流自黄龙泉泉口向下游方向水的二氧化碳分压下降,pH 和方解石饱和度 SIc 升高^[20]。表 4 则是评价钙华沉积能力主要指标的测量和计算结果。

由表 4 可知,转花池泉群方解石矿物呈未饱和状态(SIc<0),二氧化碳分压高达 26.7 kPa,是其他景观水体的 4~20 倍,碳酸氢根和钙离子浓度是 2 倍左右,其流出转花池后,进入五彩池之前变为饱和状态,开始出现钙华沉积,其旁侧的黄龙沟地表水方解石呈平衡状态。至第一循环段出口玉液泉,水体为过饱和态,钙离子浓度锐减,大量钙华形成于五彩池、映月彩池、马蹄海滩地。转花池至下游,SIc 持续增加,均保持良好的钙华沉积能力,龙泉眼 SIc 较高,主要原因为:地下水长途径流,重新溶滤了较多的方解石矿物,部分滩流在地表径流,温度升高、二氧化碳逸散导致 SIc 升高。含羞泉至龙泉眼之间的水循环段为核心景区内长度最长且地势变化最大的一段,自第二循环段出口形成含羞泉和隐芳泉两处大泉后,汇流形成地表水,水体一部分经彩池群重新渗漏进入地下,一部分则以地表滩流形式途径整个金沙铺地;地下径流部分因上覆地层压力及静水压力增加

表 4 钙华沉积能力主要指标（丰水期）

Table 4 Main indexes of travertine deposition capacity in the wet season

序号	水体	SIc	$P_{\text{CO}_2}/\text{kPa}$	$\text{HCO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{Ca}^{2+}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1	转花池泉群	-0.24	26.70	831	202.0
2	黄龙沟	-0.06	2.00	278	212.0
3	五彩池入口	0.24	7.30	790	194.0
4	东坡泉群	0.39	4.30	740	183.0
5	接仙桥地表水	0.20	1.20	401	95.0
6	玉液泉	0.15	2.20	370	121.0
7	隐芳池	0.46	0.97	494	83.1
8	含羞泉	0.19	1.10	370	96.9
9	龙泉眼	0.48	0.41	327	73.3
10	涪江	0.14	0.23	176	43.0

方解石矿物溶滤增强,自龙泉眼又重新形成泉水,地下环境变为地面环境,压力骤减,泉口气体强烈逸散,加之地表滩流部分以瀑布形式跌落至此,混合水体呈现极为强烈的脱气作用,SIc 升高,水中方解石呈明显的过饱和状态,形成大量碳酸钙微粒。隐芳池等地也出现此类现象。

黄龙核心景区钙华层内地下水基本排入涪江,

因有普通地表水混入,方解石饱和程度下降。 P_{CO_2} 在景区景观水体内普遍保持在 2 kPa 以下,含羞泉以下降到 1 kPa 以下,生成大型彩池群的条件变差。

由图 7(3)可知,重碳酸根在第一循环段下降较明显,玉液泉以北变化不大。钙离子浓度下降分 2 个阶段,第一循环段内(转花池至玉液泉段)下降明显,钙华沉积较多;玉液泉下游钙华沉积速率相差不

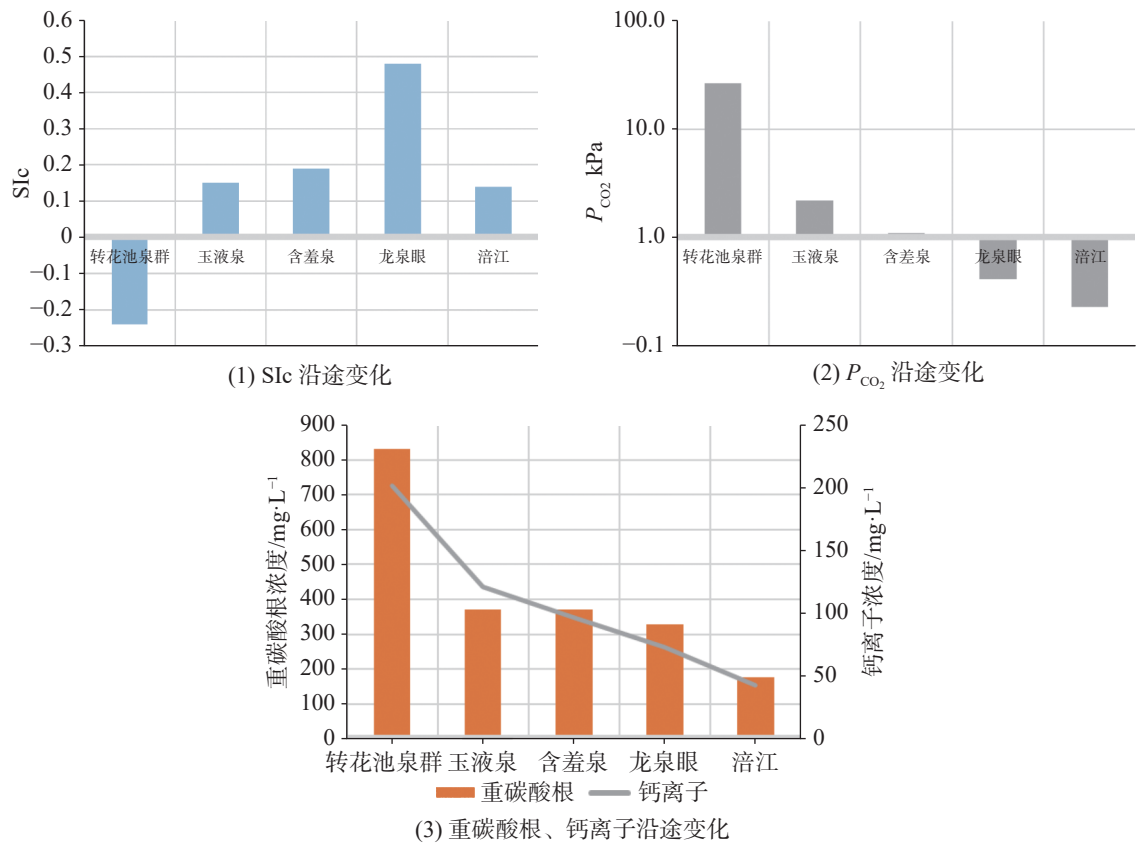


图 7 钙华沉积能力主要指标沿途变化

Fig. 7 Changes of main indexes of travertine deposition capacity

大,离子浓度呈线性衰减。

3.3.2 钙华沉积能力分析

2018 年转花池 $SIc > 0$ (表 4), 处于过饱和态, 这和多年平均降水量处于较低水平, 无足够的水量稀释离子浓度, 使得方解石处于过饱和状态有关; 2019 年以后降雨量激增, 稀释效应明显, 转花池泉群属于未饱和状态 ($SIc < 0$, 表 3)。转花池内钙华沉积减弱, 五彩池后缘沉积作用有所减轻。

由图 8 可知, 2018 年 9 月下旬的降雨导致大量雨水混入水循环, 使得方解石饱和指数降低, 稀释效应较为明显, 降低了钙华的沉积速率, 黄龙沟 804 号点的水体 SIc 值已经降到 -0.13 , 具备了一定的钙华侵蚀能力, 会对已成型钙华的改造作用增强。

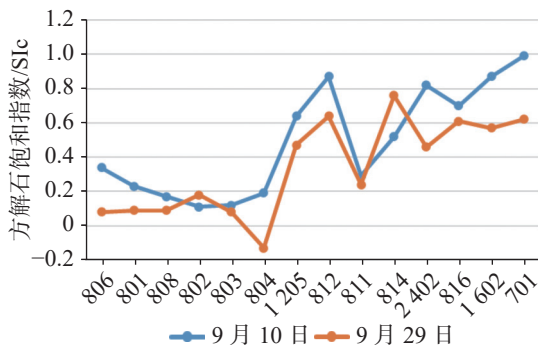


图 8 监测点水体方解石饱和指数 SIc 变化图(2018 年)

Fig. 8 Changes of calcite saturation index SIc in water at monitoring sites in 2018

由上述分析, 区内各水循环段的景观水仍具备一定的沉积能力, 2018 年数据与 1991 年数据(刘再华)相比, SIc 值普遍下降了 20% 左右(水体 SIc 普遍在 1 左右), 2019 年下降更多, 强降雨的稀释作用较为明显。

4 结 论

(1) 转花池泉群以高二氧化碳分压、高重碳酸盐、高钙为主要特征, 提供区内钙华沉积的主要钙源和碳源, 与黄龙后沟地表水一同构成驱动区内钙华景观发育演化的水源。黄龙沟的水量补给来源主体为降雨, 转花池泉群的水量补给来源则主要是冰雪融水, 但转花池的水量包含上游黄龙沟冰碛台地垂向入渗补给的部分。

(2) 1999—2017 年 18 年间, 转花池流量保持稳

定状态。2018—2020 年之间转花池流量出现一定程度的增长且已到峰值, 2021—2023 年间已经出现缓慢下降趋势。综合来看, 转花池泉群流量稳中有增且已到极值, 水质极为稳定。

(3) 2018 年转花池出现 TOC 异常高值, 主要原因是来自黄龙沟上游三道坪至头道坪一带的放牧活动, 导致牛群粪便中产生的大量有机碳, 通过地下水运移影响了转花池泉群, 造成钙华沉积速率下降, 因此, 建议加强对钙华源泉的保护, 扩大保护区范围, 减少放牧活动对钙华泉群的影响。

(4) 区内各水循环段的景观水仍具备一定的沉积能力, 2019 年 SIc 值下降, 与强降雨的稀释作用有关, 随着降雨量激增, 稀释效应明显, 转花池泉群属于未饱和状态 ($SIc < 0$), 转花池内钙华沉积减弱, 五彩池后缘沉积作用有所减轻。

参考文献

- [1] 刘再华, 田友萍, 安德军, 王海静, 唐淑, 张金流, 孙海龙, 刘彦, 张清明. 世界自然遗产——四川黄龙钙华景观的形成与演化[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 841-847.
LIU Zaihua, TIAN Youping, AN Dejun, WANG Haijing, TANG Shu, ZHANG Jinliu, SUN Hailong, LIU Yan, ZHANG Qingming. Formation and evolution of the travertine landscape at Huanglong, Sichuan, one of the World Natural Heritages[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2009, 30(6): 841-847.
- [2] 刘再华, 袁道先, W Dreybrodt, U Svesson. 四川黄龙钙华的形成[J]. 中国岩溶, 1993, 12(3): 185-191.
LIU Zaihua, YUAN Daoxian, W Dreybrodt, U Svesson. The formation of tufa in Huanglong, Sichuan[J]. Carsologica Sinica, 1993, 12(3): 185-191.
- [3] 刘再华, 游省易, 李强, 张美良. 云南白水台钙华景观的水化学和碳氧同位素特征及其在古环境重建研究中的意义[J]. 第四纪研究, 2002, 22(5): 459-467.
LIU Zaihua, YOU Shengyi, LI Qiang, ZHANG Meiliang. Hydrochemical and isotopic characteristics of tufa in the Baishuitai scenic area of Yunnan and their implications for paleoenvironment reconstruction[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(5): 459-467.
- [4] 刘再华, 袁道先, 何师意, 曹建华, 游省易, W Dreybrodt, U Svesson, K Yoshimura, R Drysdale. 四川黄龙沟景区钙华的起源和形成机理研究[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 1-10.
LIU Zaihua, YUAN Daoxian, HE Shiyi, CAO Jianhua, YOU Shengyi, W Dreybrodt, U Svesson, K Yoshimura, R Drysdale. Origin and forming mechanisms of travertine at Huanglong ravine of Sichuan[J]. Geochimica, 2003, 32(1): 1-10.
- [5] 姜泽凡, 刘艳梅, 胥良. 黄龙钙华景观形成及演化趋势研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 107-111, 116.

- JIANG Zefan, LIU Yanmei, XU Liang. A study of the formation and evolution trend of the Huanglong travertine landscape[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(1): 107-111, 116.
- [6] 刘海生, 周训, 张彧齐, 海阔, 余鸣潇, 谭梦如, 尚子琦. 温泉钙华沉积的影响因素[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 11-16.
- LIU Haisheng, ZHOU Xun, ZHANG Yuqi, HAI Kuo, YU Mingxiao, TAN Mengru, SHANG Ziqi. A brief review on the factors affecting deposition of travertines in hot springs[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 11-16.
- [7] Fouke B W. Hot-spring systems geobiology: Abiotic and biotic influences on travertine formation at Mammoth hot springs, Yellowstone National Park, USA[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(1): 170-219.
- [8] 董发勤, 代群威, 饶瀚云, 王富东, 赵学钦, 蒋忠诚, 张强, 李博文, Alexander I Malov, Enrico Capezzuoli, Augusto Auler. 黄龙与黄石钙华微生物沉积作用比较研究[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 264-272.
- DONG Faqin, DAI Qunwei, RAO Hanyun, WANG Fudong, ZHAO Xueqin, JIANG Zhongcheng, ZHANG Qiang, LI Bowen, Alexander I Malov, Enrico Capezzuoli, Augusto Auler. Comparative study on microbial deposition of travertine in Huanglong scenic area and Yellowstone National Park[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 264-272.
- [9] 赵晓夏, 李琼芳, 董发勤, 代群威, 宋娜, 董鹏举, 崔杰, 罗尧东, 张强, Xin Zhang, O'Driscoll Mike. 雪宝顶流域黄龙“8.8”地震后短内主要水环境变化特征[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(1): 77-87.
- ZHAO Xiaoxia, LI Qiongfang, DONG Faqin, DAI Qunwei, SONG Na, DONG Pengju, CUI Jie, LUO Yaodong, ZHANG Qiang, Xin Zhang, O'Driscoll Mike. Characteristics of water environment changes in a short period after the "8 August 2017" earthquake in Huanglong, Xuebaoding watershed[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 77-87.
- [10] 石岩. 黄龙水环境特征与钙华景观演化趋势研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- SHI Yan. Study on the hydro-environmental characteristics and travertine evolution at Huanglong area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [11] 卢国平. 四川黄龙-九寨沟自然风景区冷水型钙华成因的水文地球化学研究[J]. *矿物岩石*, 1994, 14(3): 71-78.
- LU Guoping. Hydrogeochemical research of cold-water travertine in Huanglong-Jiuzhai scenic spots, Sichuan Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1994, 14(3): 71-78.
- [12] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[J]. *第四纪研究*, 1993(1): 1-6.
- YUAN Daoxian. Carbon cycle and global karst[J]. *Quaternary Sciences*, 1993(1): 1-6.
- [13] 袁道先. “岩溶作用与碳循环”研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(5): 425-432.
- YUAN Daoxian. Progress in the study on karst processes and carbon cycle[J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(5): 425-432.
- [14] 胥良, 姜泽凡, 李前银. 黄龙钙华景观演化特征及保护措施探讨[J]. *地质灾害与环境保护*, 2007, 18(4): 79-84.
- XU Liang, JIANG Zefan, LI Qianyin. Study on characters of evolution and protection measures of Huanglong calc-sinter landscape[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2007, 18(4): 79-84.
- [15] 姜泽凡, 胥良, 张文彬. 黄龙钙华水来源研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2007, 18(3): 72-75.
- JIANG Zefan, XU Liang, ZHANG Wenbin. Study on source of Huanglong calc-sinter water[J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 2007, 18(3): 72-75.
- [16] 王海静. 四川黄龙沟钙华沉积溪流的水化学和同位素的时空变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- WANG Haijing. Study on the spatio-temporal variations of hydrochemistry and stable isotopes at Huanglong in Sichuan, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [17] 刘馨泽, 孙东, 曹楠, 袁楠楠, 黄何平, 田长宝, 张清明, 唐淑, 李大猛, 周大吉, 董发勤. 黄龙核心景区多层级水循环系统结构研究[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(1): 19-33.
- LIU Xinze, SUN Dong, CAO Nan, YUAN Nannan, HUANG Heping, TIAN Changbao, ZHANG Qingming, TNG Shu, LI Dameng, ZHOU Daji, DONG Faqin. Study on the structure of multi-layer water circulation system in the core scenic spot of Huanglong[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 19-33.
- [18] 万新南, 杨菊, 程温莹, 罗丽, 安德军, 唐淑, 台永东. 四川黄龙景区“源水”成因浅析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(1): 91-95.
- WAN Xinnan, YANG Ju, CHENG Wenying, LUO Li, AN Dejun, TANG Shu, TAI Yongdong. Headwater origin analysis in the Huanglong scenic spot, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2010, 37(1): 91-95.
- [19] 张金流, 鲍祥. 溶解有机碳对黄龙钙华沉积的影响[J]. *安庆师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(1): 78-82.
- ZHANG Jinliu, BAO Xiang. Quantitative study on effects of dissolved organic carbon on travertine depositions rate at Huanglong scenic spot[J]. *Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 23(1): 78-82.
- [20] 王海静, 刘再华, 曾成, 刘香玲, 孙海龙, 安德军, 唐淑, 张清明. 四川黄龙沟源头黄龙泉水及其下游溪水的水化学变化研究[J]. *地球化学*, 2009, 38(3): 307-314.
- WANG Haijing, LIU Zaihua, ZENG Cheng, LIU Xiangling, SUN Hailong, AN Dejun, TANG Shu, ZHANG Qingming. Hydrochemical variations of Huanglong spring and the stream in Huanglong ravine, Sichuan Province[J]. *Geochimica*, 2009, 38(3): 307-314.

Analysis of water environment dynamic characteristics and travertine deposition capacity in Huanglong core scenic spots

LIU Xinze¹, ZHANG Qingming², SUN Dong¹, TANG Shu², TIAN Changbao²,
HUANG Heping², ZHOU Yaping¹, XIONG Yuxia¹, LIANG Xinyu¹,
FAN Jiajun¹, FAN Ming¹, CHEN Hongwei¹

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu, Sichuan 610081, China;

2. Huanglong National Scenic Spot Administration, Songpan, Sichuan 623300, China)

Abstract The Huanglong scenic area, a World Natural Heritage, is located in the east of Songpan county, Aba Xizang and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan Province. It is a typical landscape plateau of cold-water travertine. Water in travertine landscape, as the most important carrier, controls the formation and evolution of travertine. Yuan Daoxian, Liu Zaihua, et al., from Institute of Karst, Chinese Academy of Geoscience, studied the source, sedimentary mechanism and influencing factors of the sedimentary process of travertine, which laid the foundation for the geological study of Huanglong travertine. In recent years, affected by the increasing human activities, the water environment in the Huanglong scenic area has deteriorated, resulting in local degradation of travertine landscape. Therefore, this study has been conducted to effectively assess the hydrochemical environment and the deposition capacity of travertine in Huanglong core scenic spots, and to analyze the change characteristics of hydrochemical field in these spots, thus providing corresponding support for the subsequent research on technology of travertine landscape conservation.

The research area covers all the core scenic spots of Huanglong, from Zhuanghua pool to Fujiang river. In this study, field investigation, water quality monitoring, flow monitoring and analysis of historical monitoring data were used to evaluate the water environment and explore its influence on travertine deposition. A total of 14 monitoring sites covers all springs and surface water related to the water cycle. The indexes such as pH, temperature, Ec, Ca^{2+} and HCO_3^- were measured on site. Other indexes of water quality such as PO_4^{3-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} were collected and sent to the laboratory for testing according to requirements. The rainfall and water quantity data before 2017 were provided by Huanglong Scientific Research Office, and the data from 2018 to 2021 were obtained by the authors through long-term monitoring.

Research findings show: (1) The Zhuanhuachi springs are the main calcium and carbon source of travertine deposition in the area. They, together with surface water in Huanglong valley, constitute the water source boosting the development and evolution of travertine landscape. The main sources of water recharge for Huanglong valley and Zhuanhuachi springs are rainfall and meltwater of snow. (2) Since 1999, the flow rate of Zhuanhuachi springs has increased steadily and then to the maximum. The water quality is extremely stable with average pH of 6.6, average water temperature of 6.7°C, average Ca^{2+} of 208 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The SIc is generally in an unsaturated state. The historical maximum water volume in the past 30 years appeared in 2020, with an average daily water volume of 9,998.09 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ from April to November. The water volume has experienced a slow downward trend since 2021. From 1999 to 2017, the annual average daily water volume of Zhuanhuachi springs was 7,817 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, and the annual variation of the average daily water volume was about $\pm 1,500 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. The annual average daily flow from 2018 to 2020 was 9,368 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. (3) In 2018, linear TOC anomaly zones appeared in the area of Zhuanhuachi springs, and the main anomaly points occurred at the spring mouths of No.1, No.2, No.4 and No.6. The main reason was the grazing activities from Sandao lawn to Toudao lawn in the upper reaches of Huanglong valley. The manure produced by cattle contained a large amount of organic carbon (about 15%), which dissolved in water under the effect of rainfall leaching. As the water circulation entered the groundwater and migrated to the area of Zhuanhuachi springs, the deposition rate of

travertine decreased. The TOC anomaly approximately disappeared at the north of the Zhuanhuachi springs. (4) The core scenic spots of Huanglong experienced rapid degassing from upstream to downstream. SIc increased significantly, and the concentration of HCO_3^- decreased considerably in the first cycle. But there was little change in the north of Yuye spring. The decrease of Ca^{2+} can be divided into two stages. In the first cycle section (from Zhuanhuachi springs to Yuye spring), the concentration of calcium ions decreased obviously, and there were more travertine deposits. The deposition rate of travertine in the lower reaches of Yuye spring was stable, and the ions concentration decreased linearly. (5) Landscape water in each water cycle segment in the area still shows a certain depositional capacity, because the dilution of heavy rainfall reduced the depositional capacity of travertine. The SIc value decreased in 2019.

The water environment of Huanglong core scenic spots is stable with a good capacity of travertine deposition, which maintains spring overflow, strong degassing and rapid deposition. Influenced by animal husbandry and rainfall, the deposition capacity of travertine decreased slightly. It is suggested to strengthen the protection for the conservation area of travertine spring source and reduce the influence of grazing activities on it.

Key words water environment characteristics, calcified deposition capacity, Huanglong scenic spot, water quality monitoring

(编辑 张玲)

贵州兴义、乐业-凤山、湘西等 3 个世界地质公园 通过 UNESCO 外方专家组现场考察评估

近日,中国地质调查局岩溶地质研究所技术支持贵州兴义地质公园申报世界地质公园、乐业-凤山世界地质公园扩园和再评估、湘西世界地质公园中期评估顺利通过 UNESCO 外方专家组现场考察评估。

岩溶所精心组织、高效完成地质公园申报/建设的支撑服务工作,围绕地质遗迹保护、科普教育、社区融合发展、地质旅游显示度、自然文化遗产宣传等方面,编制了地质公园中英文考察指南、141 份多语种科普宣传折页、28 部科普书籍;提供了 24 个地质公园宣传小视频、6 个 VR 全景图、3 个地质公园

宣传片和 2534 块各类标识展板、三主六副共 9 个博物馆升级改造的中英文展板,200 块岩石与古生物标本等技术和实物资料;协助建立了地质公园学校,开展系统科普培训。

地质公园的申报/建设工作受到教科文组织评估专家高度赞赏,评估分数分别为 2800 分、2700 分和 2730 分(总分为 2840),湘西世界地质公园荣获联合国教科文组织最佳实践奖。地质公园申报有力推动形成“地质旅游+”发展模式,助力三省(区)乡村振兴。

(供稿 张远海)