

赵晓夏,李琼芳,董发勤,等.雪宝顶流域黄龙“8·8”地震后短期内主要水环境变化特征[J].中国岩溶,2021,40(1):77-87.
DOI:10.11932/karst20210108

雪宝顶流域黄龙“8·8”地震后短期内主要水环境变化特征

赵晓夏¹,李琼芳¹,董发勤^{2,3},代群威^{3,4},宋娜¹,董鹏举¹,崔杰³,罗尧东³,
张强⁵,Xin Zhang⁶,O'Driscoll Mike⁷

(1. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010; 3. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 4. 西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010; 5. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541000; 6. 西北太平洋国家实验室物理与计算科学指挥部, 美国 华盛顿 99354; 7. 工业矿物服务与研究有限公司, 英国 萨里 埃普索姆 KT17 4RH)

摘要:富含 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的水体是黄龙钙华地貌得以持续沉积的首要条件。为明确2017年九寨沟“8·8”地震是否对黄龙脆弱钙华体产生影响并进而导致水环境的改变,于2017年10月和2018年8月对黄龙3个主要监测点进行了水样采集和水质参数检测。通过主成分分析震前的多次水质检测结果,得到影响黄龙水化学的主要参数,并与震后的水化学参数进行对比分析,发现:2016年(震前)水质参数显示pH、总磷、总氮对黄龙水质起主要贡献作用,地震后水体的pH、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量上升,而总磷含量则下降较多,表明地震对黄龙钙华体内部结构产生了影响,导致上升泉(转花泉)中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量增加,并影响了pH,而震后水体中的总磷含量减少,这可能与游客数量大幅度减少有关;“8·8”地震对黄龙钙华沉积区水环境造成了影响,并有利于钙华沉积。

关键词:钙华;地震;水化学;黄龙

中图分类号:X143 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)01-0077-11 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

钙华又称石灰华,通常形成于地表,是由岩溶泉、河、地下水等沉积形成的大孔隙次生非海相碳酸盐沉积物^[1-2]。钙华的形成通常被认为是化学、物理等非生物因素和植物、微生物等生物因素共同作用的结果^[3]。由于钙华独特的纹层结构、内含古生物化石标本和地球化学特征能够为重建古生态环境、探索早期生命起源和古地球构造运动等研究提供高分辨率的信息而受到极大的关注^[4-8]。

黄龙是以规模宏大、结构奇巧、色彩艳丽的地表钙华景观闻名的世界自然遗产。水是地表钙华沉积条件中最不可或缺的一环,水充当着钙华沉积所需各种离子的载体,水也为参与钙华沉积的各种生物提供了适合的生境^[9-10]。碳酸钙的沉积受到地球化学的严格控制,pH、 CO_2 分压以及 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量在钙华沉积中起着决定性的作用。刘再华等^[11]在对黄龙高寒钙华的研究中发现,在水流速度快的地方, CO_2 溢出较快,碳酸钙的沉积也较快,尤其是在钙华的边石坝上。在碳酸钙沉淀过程中,如果存在比 Ca^{2+}

基金项目:国家自然科学基金(41472309,41572035,41877288);四川省科技厅科技支撑项目(2016FZ0043)

第一作者简介:赵晓夏(1995—),男,硕士,主要从事环境微生物学研究。E-mail:997054922@qq.com。

通信作者:李琼芳(1973—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为环境及地质微生物学。E-mail:liqiongfang1992@126.com。

收稿日期:2020-09-20

重的离子和TOC,则会影响碳酸钙晶体的形态^[12]。因此,对钙华沉积水环境变化的研究,是保护钙华景观的前提。

近年来,黄龙旅游压力剧增,钙华黑化和砂化现象严重^[13-14]。在2017年8月8日,九寨沟县发生了7.0级地震,震中距黄龙自然风景区不足100 km,因此极有可能对黄龙的疏松钙华体产生影响,从而影响水化学环境。本研究通过对比分析地震前后的主要水质参数,探讨地震对黄龙钙华体结构的影响,以期提出应对和保育措施提供理论依据。

1 研究区概况

黄龙自然风景保护区位于四川省阿坝州松潘县内,是以岩溶地貌为主的钙华景区,主景区黄龙沟全长约3.6 km,海拔为3 100~3 569 m^[15]。形成黄龙钙华补给区的岩系以泥盆系至二叠系碳酸盐岩为主(图1),其为黄龙钙华景观的形成提供了物质基础^[16]。景区属于高原温带—亚寒带季风气候,年均气温为3~7℃,每年5月至10月为丰水季,同时每年的大气降水丰水期与泉水丰水期流量基本吻合,11月至次年4月为枯水季,年均降水量约为720 mm^[17]。

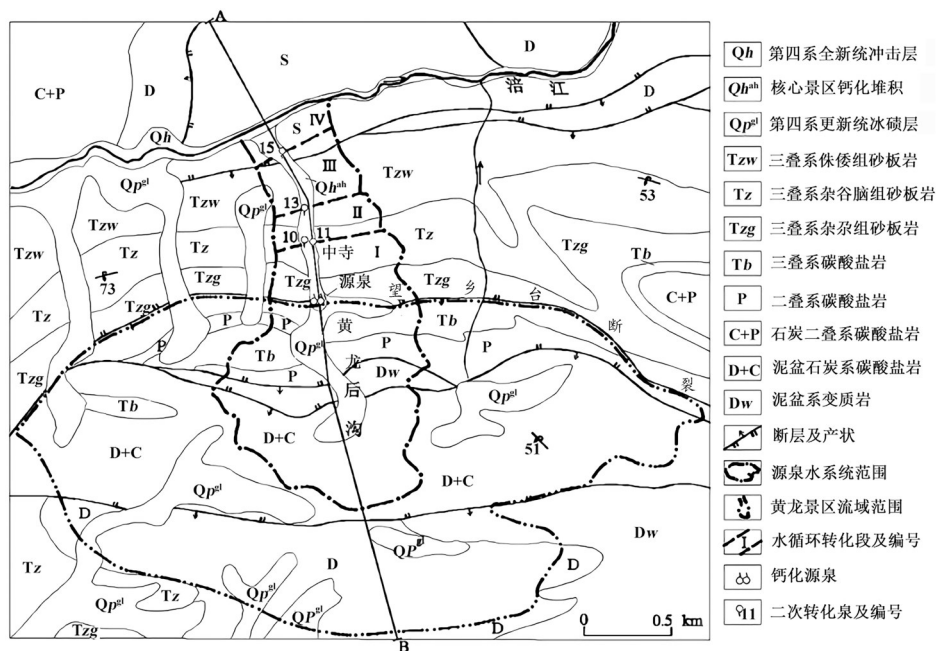


图1 黄龙景区地质构造及水循环系统略图^[18]

Fig. 1 Sketch of geological structure and water circulation system at the Huanglong scenic spot

2 研究方法

本研究于震前(2016年)分别对黄龙沟景区的13

个主要景点(图2,7#地表水为雪山融水)水化学参数进行了测定,地震后(2017年和2018年)对转花泉、争艳彩池和迎宾池进行了主要水化学参数的测定。

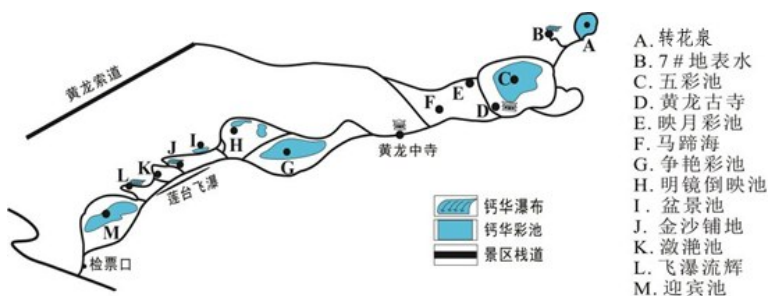


图2 黄龙景区采样位点示意图

Fig. 2 Sampling sites at Huanglong scenic spot

现场对每个采样点采用三点采样法,即采集同一个位点 3 个不同方位的水样进行混合,然后使用 DDB-303A 电导率仪、GTPH30 pH 计现场测定水体的电导率和 pH,同时测定水体温度。用相同的方法采集两瓶水样(各 500 mL),用孔径为 0.45 μm 的纤维滤膜过滤除杂,其中一瓶滴加 1~2 滴 0.1 mol/L H₂SO₄ (不含钙、镁离子)用于防止 Ca²⁺ 沉淀;冷藏,带至实验室后依据《水和废水监测分析方法》^[19]对 Ca²⁺、SO₄²⁻、Mg²⁺、HCO₃⁻ 含量,化学需氧量(COD),总有机碳(TOC),总碳(TC),总无机碳(TIC),总氮(TN),总磷(TP)进行分析。数据分析和计算采用 Origin2019b, R 语言(R-3.6.3)和 SPSS 25.0 等软件。主要分析仪器及设备详见表 1。

表 1 主要分析仪器
Table 1 Main analytic instruments

名称	型号	生产厂商
电导率仪	DDB-303A	上海仪电科学仪器股份有限公司
pH 计	GTPH30	德国 GeneTest 公司
COD 分析仪	HH-3	美国 HACH 公司
总氮总磷快速测定仪	LH-3BN	美国 HACH 公司
离子色谱仪	ICS-900	江苏汉邦科技有限公司
总有机氮分析仪	LiquiTOC II	德国 Elementar 公司

3 结果与分析

3.1 震前不同月份黄龙水化学特征

在地震前,多次对黄龙景区的水化学进行测定,以 2016 年为例,5 月、8 月和 11 月的水化学参数见表 2。黄龙所有监测点除转花泉外,水质皆呈弱碱性,pH 由 pH≈6.8(转花泉)上升到 pH≈8.3。从转花泉到盆景池,同一监测点的水体 5 月 pH 低于 8 月和 11 月;在映月彩池,5 月和 11 月的 pH 都出现了降低的现象,这可能是水体中生物种类及生物量增加,分泌的酸性物质增加导致水体 pH 降低。金沙铺地在 3 个时间段的 pH 均低于上游的盆景池,尤以 11 月为甚,这是由于在金沙铺地有下降泉(含羞泉)汇入,经过 8 月地表水的补给后,泉流量大于 5 月,造成了此监测点 11 月 pH 的下降。各监测点 8 月水体电导率都基本高于 5 月和 11 月,可能是 8 月正处于雨季中,雨水冲刷上游山体岩石,导致水体中离子溶解物增加,导致了 E_c 值上升。转花泉的 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 浓度在 3 个月份

中都比其他采样点高,Ca²⁺ 浓度为 200~340 mg·L⁻¹,HCO₃⁻ 浓度为 542.5~727.2 mg·L⁻¹,在 8 月份 HCO₃⁻ 浓度达到了最高(图 3a,图 3b)。8 月和 11 月同一采样点水体 Mg²⁺ 含量变化趋势基本一致,各采样点 11 月 Mg²⁺ 浓度含量要高于 5 月和 8 月(图 3d)。SO₄²⁻ 含量大致在 25 mg·L⁻¹ 上下波动,且 8 月的 SO₄²⁻ 含量普遍要高于 5 月和 11 月。

水体中的总碳是有机碳和无机碳的总和。其中五彩池的 TOC 在 3 个月份中都为最高,11 月的含量略高于其余两个月份,约为 30 mg·L⁻¹,推测是由于 11 月的五彩池中黄藻大量生长,产生的有机代谢产物导致 TOC 升高。水体中 TIC 主要为 CO₂、CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻,从表 2 中可看出不同采样点 TIC 含量在 3 个月份呈现一致的变化规律,均随着采样地点海拔的下降而降低,这与 HCO₃⁻ 的变化规律一致。8 月 TP 的含量最高,5 月最低,几乎为 0 mg·L⁻¹(图 3c),8 月是黄龙风景区的旅游旺季,TP 的急剧上升有可能是旅游等人类活动所产生的结果。TN 则是 11 月最高,5 月最低,11 月 TN 高可能是由于藻类开始死亡、落叶腐败等原因,生物细胞中的有机氮大量释放出来,造成了 11 月 TN 含量增加。

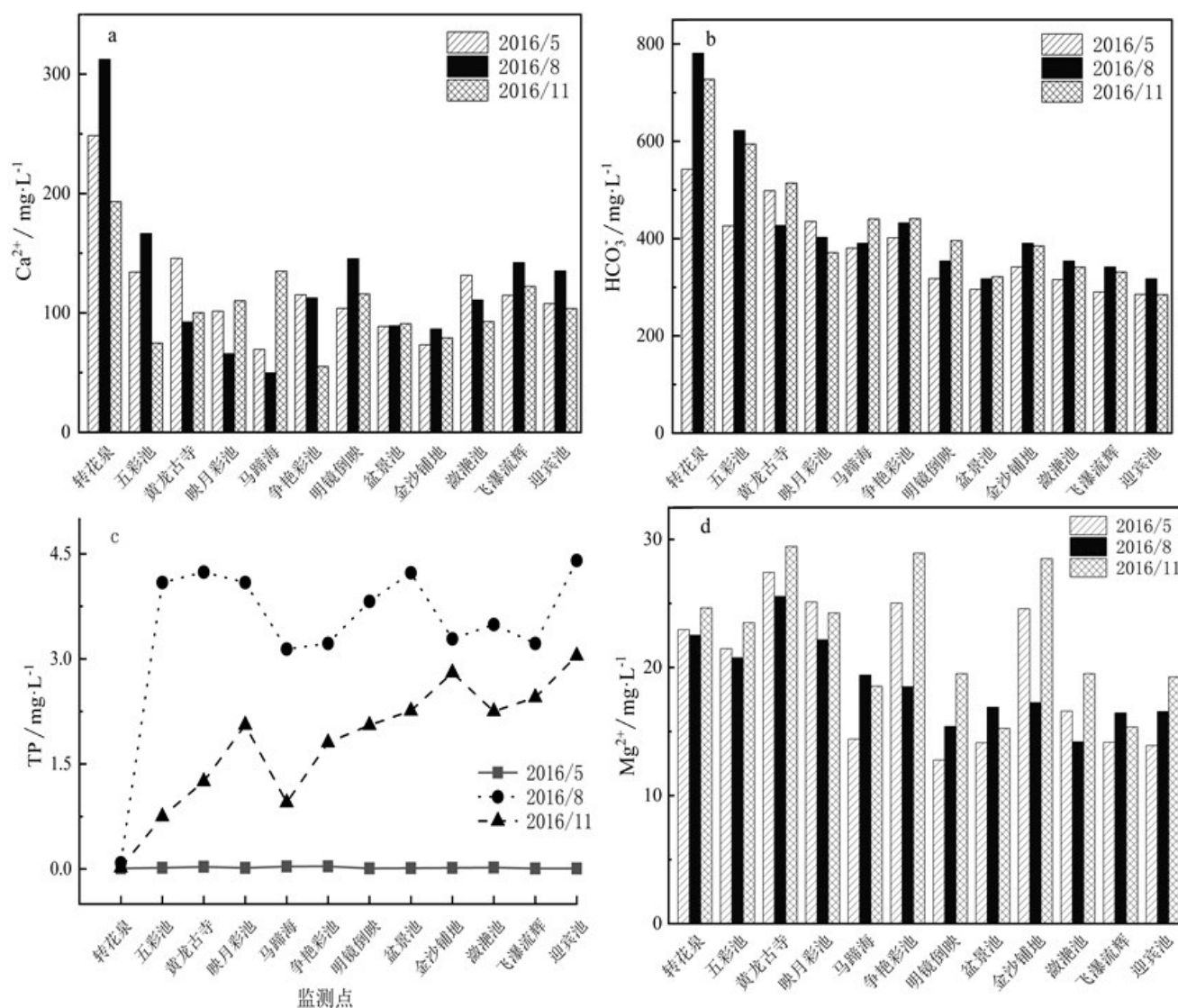
3.2 水质参数主成分分析

主成分分析 2016 年 5 月、8 月和 11 月水化学参数,结果见图 4。5 月 pH 对 Dim1 和 Dim2 的贡献量最大;TP、TC、TIC、TOC、COD、Mg²⁺、HCO₃⁻ 等水质参数对 Dim2 起重要贡献,其中以 TP、Mg²⁺、HCO₃⁻ 为主。在 pH 附近集中了 6 号和 7 号采样点,表明这两个采样点水化学参数主要受 pH 的影响。

2,3,4,7 号采样点主要受到 TP、Mg²⁺、HCO₃⁻ 的影响。从图 4b 中看出 pH、TP 对 Dim1 的贡献量最大,且这两个参数对 6,7,8,9,10 号采样点起主要的控制作用;Ca²⁺、TN、E_c、TIC、TC 对 Dim2 起主要的贡献,同时这些水质参数在 1 号、2 号采样点水环境中起主要的调控作用。从图 4c 可知,TP、TN 和 pH 同时在 Dim1、Dim2 中占主要的贡献量,TOC、COD、SO₄²⁻、Mg²⁺、HCO₃⁻ 在 Dim2 中占主要的贡献量,7 号、8 号、10 号采样点主要受到 TP、TN 和 pH 的影响,3 号、4 号、5 号采样点主要受 TOC、COD、SO₄²⁻、Mg²⁺、HCO₃⁻ 的影响。从图 4 可知,3 个月份中 pH 对于主成分 Dim1 和 Dim2 的贡献量都要大于其余的水质参数。分析发现影响黄龙水化学的主要水质参数是 pH、TP 和 TN。

表2 2016年水质参数变化
Table 2 Changes of water quality parameters in 2016

项目	日期	采样地											
		转花泉	五彩池	黄龙古寺	映月彩池	马蹄海	争艳彩池	明镜倒映	盆景池	金沙铺地	漱澗池	飞瀑流辉	迎宾池
pH	2016/5	6.85	8.10	8.12	7.74	8.45	8.33	8.35	8.62	8.53	8.41	8.82	8.37
	2016/8	6.83	7.33	7.30	7.52	7.66	7.74	7.76	8.09	7.90	7.84	8.17	8.14
	2016/11	7.05	8.28	8.54	7.78	8.61	8.48	8.51	8.72	7.63	8.04	8.39	8.69
$E_c/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	2016/5	8.69	6.63	7.54	4.26	5.15	6.12	6.81	5.39	5.68	4.98	5.03	5.70
	2016/8	8.95	6.11	6.56	4.95	4.36	5.50	5.10	3.61	4.39	3.70	3.84	4.18
	2016/11	6.50	6.10	4.61	4.39	4.67	4.39	3.70	3.84	4.11	4.56	4.95	3.89
$\text{Ca}^{2+}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	248.50	134.22	145.71	101.45	69.43	115.23	103.77	88.65	73.25	131.54	114.66	107.79
	2016/8	312.35	245.35	210.81	166.44	49.78	112.55	115.21	312.35	108.40	245.35	210.81	166.44
	2016/11	210.14	193.21	135.03	124.67	55.19	100.25	115.90	90.90	79.15	92.76	122.29	103.71
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	37.59	35.82	41.02	27.05	30.49	30.86	39.46	36.24	35.90	31.97	27.36	28.83
	2016/8	38.95	35.37	36.43	31.25	32.1	29.33	33.21	26.68	28.17	20.65	26.84	26.39
	2016/11	23.07	26.31	27.49	26.07	27.24	23.11	24.73	22.72	24.85	20.58	24.64	25.36
$\text{HCO}_3^{-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	542.50	498.20	435.10	426.20	401.80	380.40	317.50	295.40	341.80	315.60	290.10	285.10
	2016/8	780.80	622.20	432.10	402.60	390.40	427.00	353.80	317.20	390.40	353.80	341.60	317.20
	2016/11	627.20	594.50	514.20	440.50	371.20	440.80	396.20	321.80	385.10	341.40	331.20	284.60
$\text{Mg}^{2+}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	22.95	21.48	27.42	25.16	14.41	25.03	12.77	14.13	24.58	16.59	14.16	13.90
	2016/8	23.52	24.76	25.55	18.17	17.41	18.49	15.40	16.90	27.26	14.20	16.45	16.56
	2016/11	24.65	23.51	29.45	24.26	18.54	28.91	19.52	15.25	28.50	19.52	15.36	19.25
$\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	2.41	1.50	0.03	2.41	0.75	0.69	1.39	1.18	0.45	0.98	1.60	0.77
	2016/8	2.38	2.76	0.24	2.74	0.72	1.72	1.95	1.75	1.74	1.92	1.73	1.73
	2016/11	1.98	2.94	1.31	2.91	1.11	2.91	3.00	2.72	2.42	2.89	2.65	2.36
$\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
	2016/8	0.09	4.09	4.24	4.09	3.14	3.22	3.82	4.23	3.29	3.49	3.22	4.41
	2016/11	0.02	0.75	1.25	2.06	0.95	1.81	2.05	2.26	2.80	2.25	2.45	3.05
$\text{TOC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	12.41	23.98	10.30	15.10	10.75	6.69	5.39	4.56	4.21	2.96	2.35	0.77
	2016/8	15.73	26.16	15.81	23.08	14.84	12.65	15.88	9.27	9.13	5.01	8.58	5.25
	2016/11	11.35	31.36	13.80	33.87	23.19	15.58	16.95	12.95	11.42	5.84	9.49	6.63
$\text{COD}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	3.21	4.26	3.96	5.49	1.25	3.96	3.56	3.43	2.95	0.95	0.94	0.21
	2016/8	3.82	5.25	4.36	6.52	1.86	5.85	4.68	4.13	3.85	1.24	1.06	0.01
	2016/11	3.43	4.52	4.42	6.02	1.52	6.02	4.52	4.52	4.52	1.51	1.51	0.03
$\text{TIC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	141.98	106.58	92.63	58.31	56.90	58.76	42.45	35.86	49.85	43.58	39.35	43.44
	2016/8	161.54	109.84	64.26	68.43	46.28	49.98	31.61	43.89	51.92	48.31	47.89	40.21
	2016/11	220.83	122.05	81.23	83.87	67.89	61.67	52.99	58.43	57.69	55.24	56.34	53.94
$\text{TC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2016/5	154.39	130.56	102.93	73.41	67.65	65.45	47.84	40.42	54.06	46.54	41.70	44.21
	2016/8	177.27	136.00	80.07	91.51	61.12	62.63	47.49	53.16	61.05	53.32	56.47	45.46
	2016/11	232.18	153.41	95.03	117.74	91.08	77.25	69.94	71.38	69.11	61.08	65.83	60.57

图3 2016年 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、TP和 Mg^{2+} 含量的变化规律Fig. 3 Variation of Ca^{2+} , HCO_3^- , TP and Mg^{2+} content in 2016

3.3 “8·8”地震前后主要采样点水质参数变化

地震后,课题组对黄龙主要水化学参数进行了监测,并在2018年(地震后一年)又进行了测定,其结果见表3。图5显示出,2017年10月黄龙主要水质参数pH、TP、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 含量要略高于2018年8月。从转花泉到迎宾池,TP含量呈现上升趋势,迎宾池含量最高,为 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量呈现下降趋势。在转花泉处,2017年10月 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量最高,分别为 $428.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1030.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

通过对比震前(2016年8月)、震后(2017年10月和2018年8月)主要水质参数的变化发现,地震前后随着采样点海拔高度的降低,水体pH均表现为上升。转花泉、争艳彩池的pH震后高于震前,但迎宾池震前震后的pH变化不显著(图6a)。

地震后,3个彩池中的TP含量均显著降低,与震前相比,争艳彩池和迎宾池中TP含量均下降了 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,而转花泉因为一直杜绝游客进入,故前后基本没有变化(图6b)。转花泉地震前后的TN含量均高于争艳彩池和迎宾池,为 $2.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,但是震后TN含量出现了明显的下降。地震前后争艳彩池和迎宾池的TN含量变化不明显(图6c)。

Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是钙华沉积中最重要的两种离子,从图6d和图6e可看出,震后3个监测点的 Ca^{2+} 浓度都显著增加了,分别为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右、 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右、 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; HCO_3^- 的浓度在震后也出现了显著提高,与震前相比,震后2017年转花泉和争艳彩池的 HCO_3^- 浓度分别增加了 $322 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $302 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 增加的原因可能是地震导致裂缝增加,

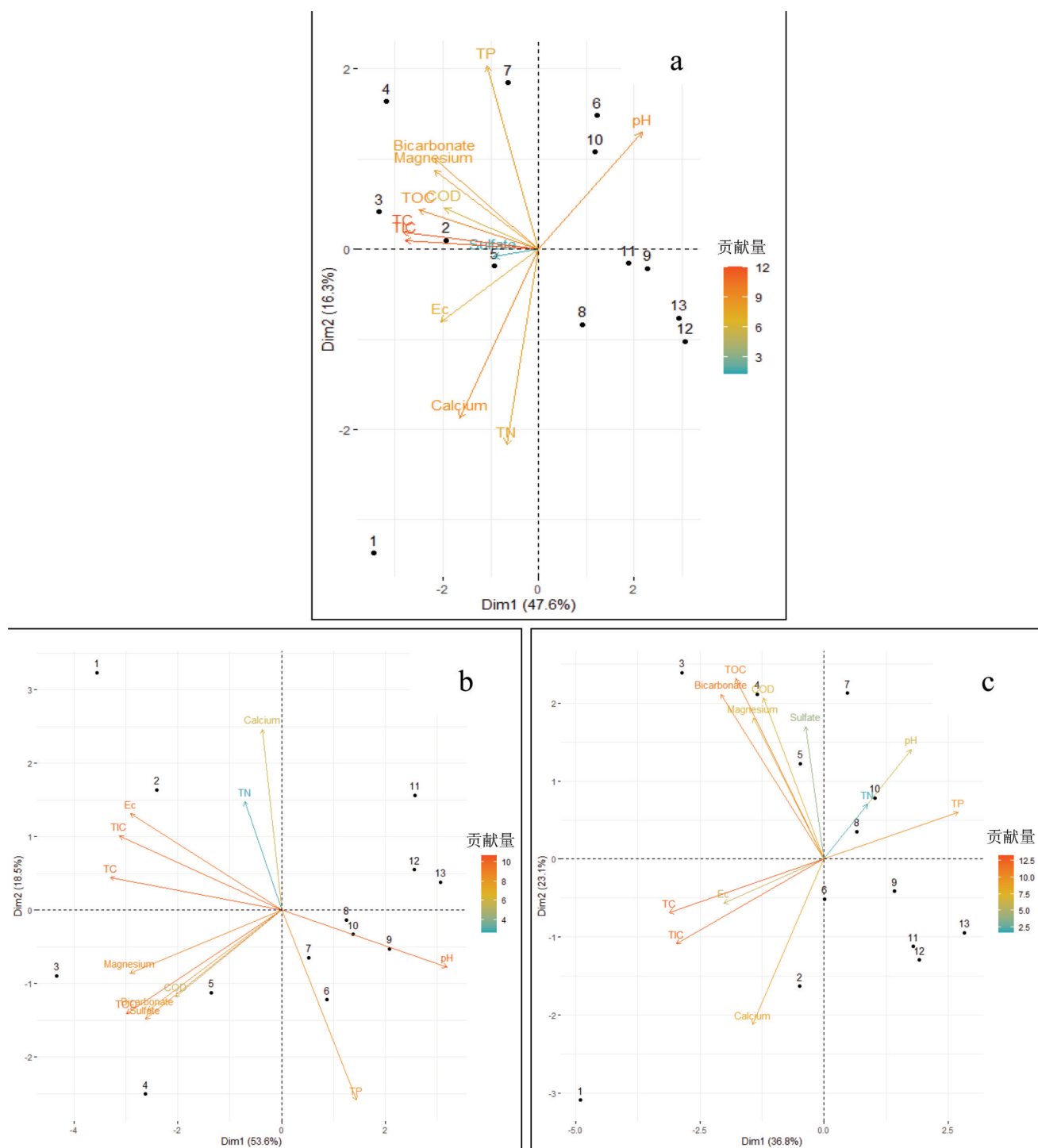


图4 2016年5月、8月和11月水质参数主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of water quality parameters in May, August and November, 2016

a. 5月水质参数主成分分析 b. 8月水质参数主成分分析 c. 11月水质参数主成分分析

注: 用R语言绘图(R-3.6.3), 图中箭头长短代表着主成分矩阵系数的大小, 箭头颜色的变化代表每个变量对某一主成分的贡献量; 图中的数字代表采样地点(按顺序依次为: 1. 转花泉, 2. 7#地表水, 3. 五彩池, 4. 黄龙古寺, 5. 映月彩池, 6. 马蹄海, 7. 争艳彩池, 8. 明镜倒映, 9. 盆景池, 10. 金沙铺地, 11. 漱池, 12. 飞瀑流辉, 13. 迎宾池)。

改变了地下水的径流条件, 增强了地下水与周围岩间的水岩作用。图6f显示出, TOC含量在3个监测点震后皆出现了显著下降, 且2017年10月与2018年8

月相比, 各监测点在2018年8月的TOC含量要低于2017年10月, 这可能与黄龙景区采取了对藻类的治理措施有关。

表3 2017年、2018年主要水化学参数变化
Table 3 Main hydrochemical parameters changes in 2017 and 2018

		pH	$Ec/mS\cdot cm^{-1}$	$TP/mg\cdot L^{-1}$	$TN/mg\cdot L^{-1}$	$Ca^{2+}/mg\cdot L^{-1}$	$HCO_3^{-}/mg\cdot L^{-1}$	$TOC/mg\cdot L^{-1}$
转花泉	2017/10	7.85	5.57	0.09	2.25	428.23	1 030.12	13.18
	2018/8	7.80	5.71	0.10	2.24	386.20	846.15	6.61
五彩池	2017/10	8.26	4.66	2.15	1.88	189.75	968.58	12.98
	2018/8	8.28	4.33	2.50	1.62	168.42	754.65	6.24
争艳彩池	2017/10	8.18	4.61	2.23	1.72	151.24	751.63	12.21
	2018/8	8.20	4.52	2.43	1.76	142.32	550.42	6.65
飞瀑流辉	2017/10	7.85	5.51	3.30	1.82	182.85	370.85	4.10
	2018/8	8.00	5.25	3.15	1.78	168.16	380.41	4.68
迎宾池	2017/10	8.10	4.48	3.26	1.78	186.21	360.12	3.88
	2018/8	8.01	5.11	3.25	1.76	172.52	386.42	4.20

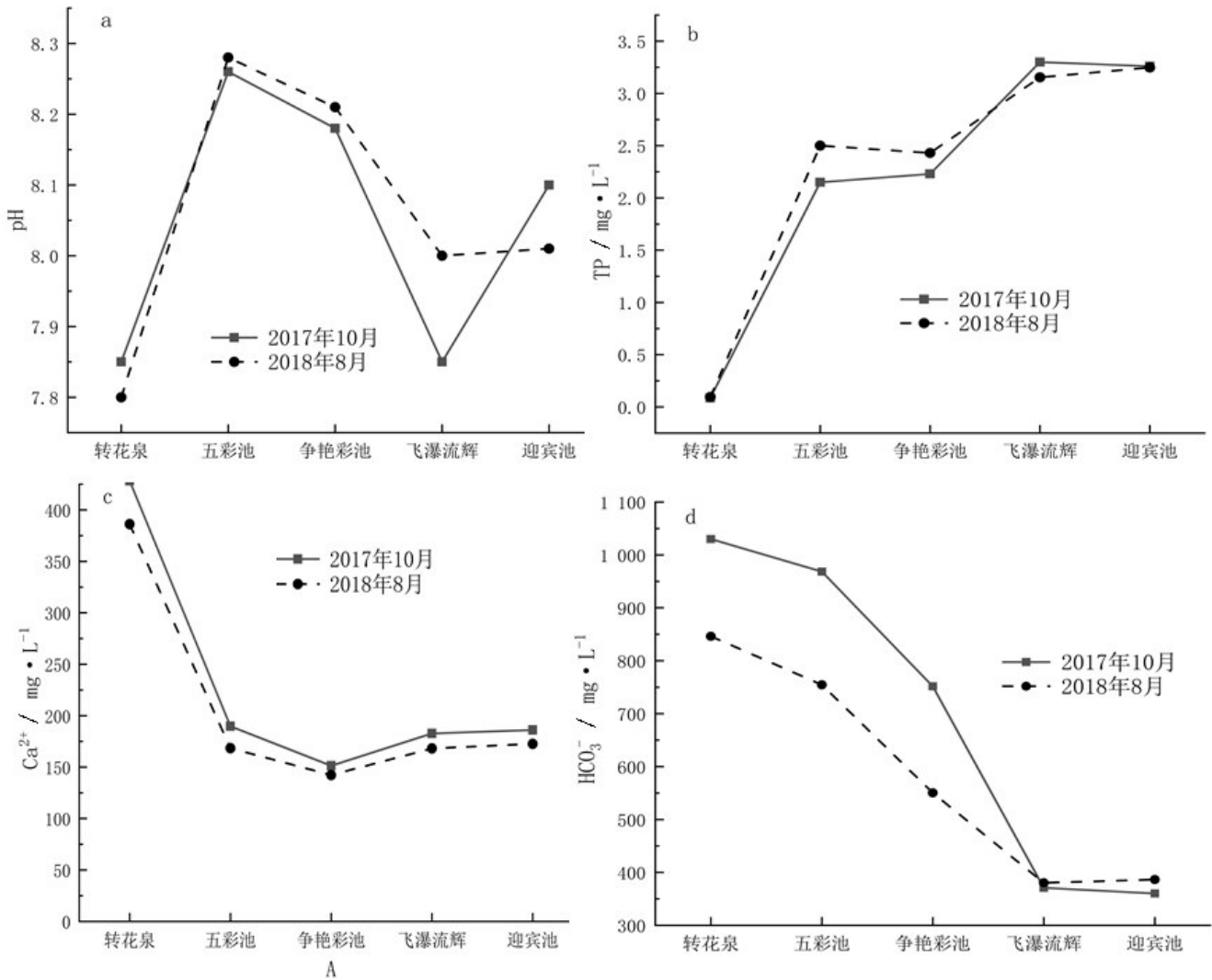


图5 地震后,2017年和2018年主要水质参数变化

Fig. 5 Changes of main water quality parameters after earthquakes in 2017 and 2018

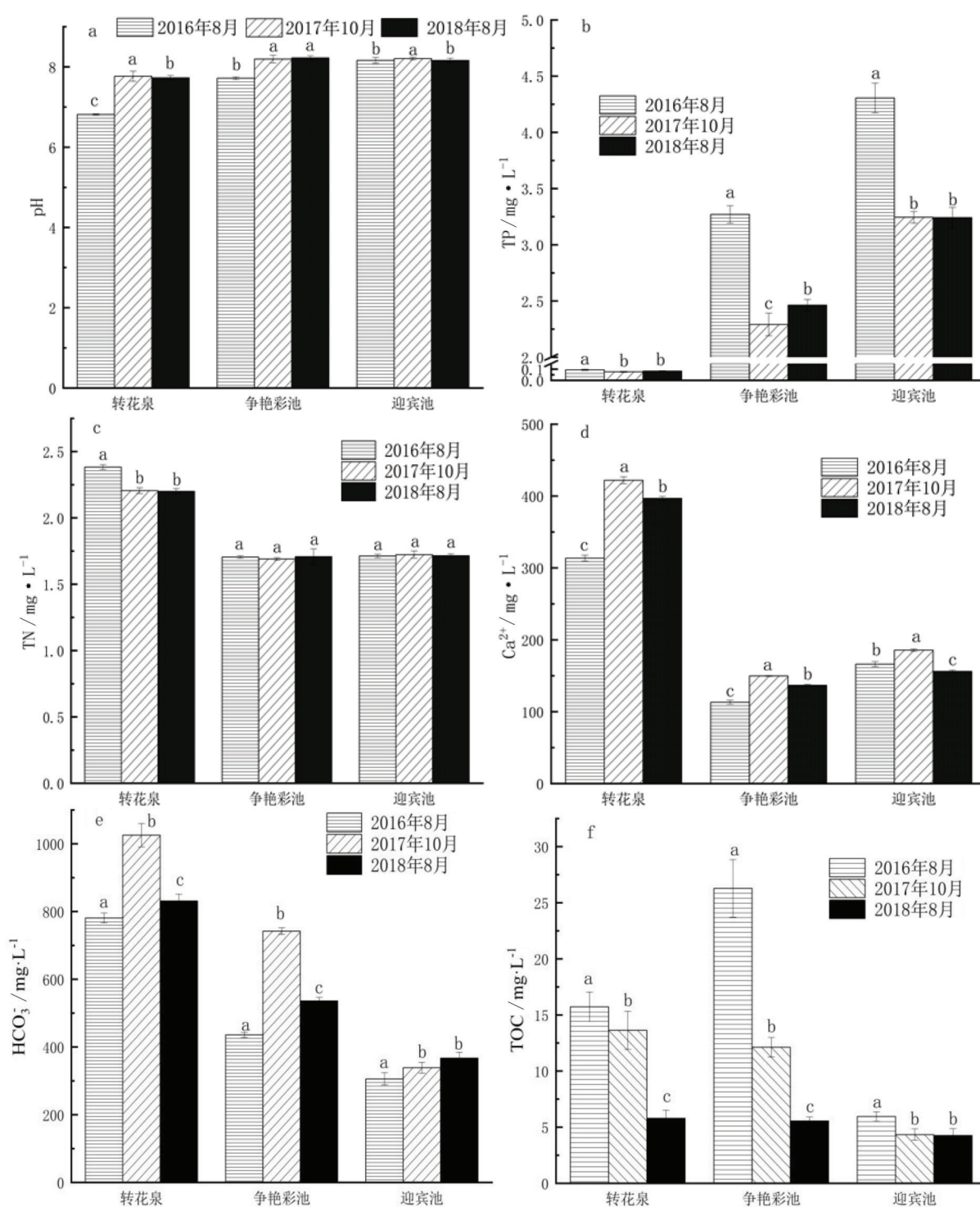


图6 地震后主要水质参数变化

Fig. 6 Changes of main water quality parameters after earthquakes

注:图中相同字母代表差异不显著,字母不相同则差异显著($P < 0.05$)。

4 讨论

4.1 地质活动对钙华沉积区主要水化学参数的影响

黄龙降水集中在6-9月,约占全年的70%^[20]。党

政等^[21]发现九寨沟“8·8”地震后的两个月,降雨量较历年同期有大幅度升高,震后的暴雨增加了径流量。黄龙钙华拥有独特的“海绵”构造^[22],这种多孔、疏松的构造极易造成钙华体内部塌陷形成空洞^[23]而引起地表水的下渗,再经过水岩作用便会造成溶解在水

体中的 Ca^{2+} 浓度增高(图 6d)。在地质活动过程中,常常会挤压地壳内部流体,这会导致如 CO_2 、 SO_2 等气体大批量溢出^[24],有一部分会被地下水吸收,这可能导致震后水体中 HCO_3^- 升高(图 6e)。杨俊义等^[25]研究发现地质活动易造成地表水改道,出现许多弯折水流,在这些弯折处易形成钙华漏斗,形成钙华漏斗后,地表钙华沉积区水量进一步减少,水量减少严重威胁黄龙景观。黄龙水体来源有大气降水和雪山融水,其中最主要的来源为大气降水^[26],来自于岷山主峰雪宝顶的雪山融水对黄龙的水源补给也起着举足轻重的作用。

蛋白质的合成需要氮,DNA 和 RNA 的合成需要磷,且磷是藻类生长的限制性营养条件^[27]。黄龙地处高海拔山区,没有从事工业发展和大规模农业种植的条件,因此可认为水体中的 TP 主要为无机磷。从图 3c 可看出,黄龙水体内的 TP 在转花泉处,无论何种月份的含量都几乎为零,尤其是在 5 月 TP 的含量在所有监测点基本都为零,但是到了旅游旺季月份,尤其是 8 月份,转花泉下游水体中的 TP 急剧上升,并且其含量从五彩池一直到迎宾池几乎都保持在 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。这与刘再华等^[11]在黄龙得出的 TP 距泉口的含量变化趋势图相同。但本研究发现,在 2016 年测得的含量要比刘再华等测量的 TP ($0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 要高许多。一方面,水体中 TP 的增加会使得藻类急剧增加,有些藻类(如丝状藻,小球藻)附生在钙华表面,一旦枯水季到来,水量减少导致边缘区域钙华体表面干涸,水的缺失使得藻类死亡而使钙华变黑^[28]。另一方面,磷可作为碳酸钙沉淀的阻滞剂。Efthimios K 等^[29]研究发现,在碳酸钙的饱和溶液中,磷酸盐的存在对方解石的结晶速度有着显著影响, PO_4^{3-} 吸附在了方解石晶体生长的活性位,从而降低了晶体的生长速率。有研究表明,在 pH 为 6.9~8.6 的范围内,文石和方解石的生长速率随 PO_4^{3-} 浓度的增加而降低^[30-32],表 2 显示出黄龙水体的 pH 范围大致为 6.8~8.7,这无疑进一步加大了 TP 对钙华沉积的影响。同时,磷酸盐的吸附,可能会导致钙华周围磷含量的相对增加,从而使得附着于钙华体表面的藻类更易生长,加剧钙华的黑化和砂化^[33]。

震前五彩池处游客流量大且驻足时间长,可明显看到此处的 TP 上升(图 3c),TP 上升的同时, HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的浓度都出现了小幅度的上升(图 3a,

图 3b),这也印证了上述观点。震后黄龙水体中的 TP 和 TN 含量呈现明显的下降(图 6b,图 6c)。由此可见,震后 3 个主要监测点 TP 的下降与景区从事旅游活动的人数有着很大关系,由于地震后旅游人数减少,导致了水体中 TP 含量下降。

4.2 水化学变化介导钙华元素组成的改变

黄龙钙华沉积水体属于 Ca-HCO_3 型和 $\text{Ca-HCO}_3\text{-Mg}$ 型水质,其形成的钙华主要为方解石型碳酸钙^[34]。在表 2 中,转花泉 Ca^{2+} 含量在到达五彩池后发生了下降,这可能是由于随着水流到达五彩池后,地势变得平坦,同时由于五彩池边石坝的阻拦,水流逐渐变缓,地势变得平坦,水流切面变薄,加之五彩池周围无树木等遮蔽物, CaCO_3 得以迅速沉积。由于五彩池是整个黄龙钙华沉积的第一个点,水体中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量高,其成为了整个黄龙钙华沉积速率最快的一个点。自五彩池之后,随着海拔下降,水体中 Ca^{2+} 含量呈现下降趋势,维持在 $70\sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。此变化在一定程度上说明钙华处于一个溶蚀和沉积的动态过程^[35]。同时 Mg^{2+} 含量的稳态变化,表明在碳酸钙的沉积过程中只有少部分 Mg^{2+} 参与其中,共同形成钙华景观(图 3d)。冯晨旭等^[1]的研究发现,雨季雨量充沛,导致大量土壤中的物质被雨水带入钙华彩池,导致钙华中含有 Si^{2+} 、 Fe^{2+} 等,而在旱季钙华中几乎不含有其他元素。

5 结 论

(1)分析 2016 年 5 月、8 月和 11 月的水化学数据,发现黄龙地表水环境主要受到 pH、TP 和 TN 的影响;水体中 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 变化较为复杂,主要受到不同时期水量的影响,5 月、11 月水量较少,部分地区出现断流和死水现象,不同地点水质不能得到同等程度上的更新,在一定时间段内,水体离子变化受到影响,呈现出不规律的变化趋势;水体中 TP 含量在 5 月很低,而在 8 月和 11 月急剧升高,“8·8”地震后,水体中 TP 含量出现明显下降;

(2)地震对黄龙主要水质参数的影响较小,地震造成地下裂缝增加,从而导致地下水中的岩溶物质增加,使得黄龙水体中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度升高;震后,主要景点处的 TP、TOC 皆出现了较显著下降。

参考文献

- [1] 冯晨旭, 董发勤, 代群威, 等. 黄龙钙华纹层石特征与成因分析[J]. 矿物学报, 2019, 39(1): 55-63.
- [2] 汪智军, 殷建军, 蒲俊兵, 等. 钙华生物沉积作用研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 606-617.
- [3] CAPEZZUOLI E, GANDIN A, PEDLEY M. Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art[J]. Sedimentology, 2014, 61(1): 1-21.
- [4] 晏浩, 刘再华. 层状钙华及其地球化学指标的古气候/环境意义[J]. 第四纪研究, 2011, 31(1): 88-95.
- [5] 曾振宇, 晏浩, 孙海龙, 等. 云南白水台钙华池出入口水化学和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 昼夜变化的影响因素及水生光合作用影响比例的计算[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 605-613.
- [6] MIOCIC J M, GILFILLAN S M V, FRANK N, et al. 420, 000 year assessment of fault leakage rates shows geological carbon storage is secure [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 769-778.
- [7] Yuan G L, Wu M Z, Sun Y, et al. One century of air deposition of hydrocarbons recorded in travertine in North Tibetan Plateau, China: sources and evolution[J]. Science of the Total Environment, 2016, 560: 212-217.
- [8] 文华国, 罗连超, 罗晓彤, 等. 陆地热泉钙华研究进展与展望[J]. 沉积学报, 2019, 37(6): 1162-1180.
- [9] 刘海生, 周训, 张彥齐, 等. 温泉钙华沉积的影响因素[J]. 中国岩溶, 2020, 39(1): 11-16.
- [10] 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.
- [11] 刘再华, 田友萍, 安德军, 等. 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.
- [12] ACOBSON R L, USDOWSKI E. Geochemical controls on a calcite precipitating spring[J]. Contributions to mineralogy and petrology, 1975, 51(1): 65-74.
- [13] 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(4): 79-84.
- [14] 张金流, 王海静, 董立, 等. 世界遗产——四川黄龙钙华景观退化现象、原因及保护对策分析[J]. 地球学报, 2012, 33(1): 111-120.
- [15] 刘再华, 袁道先, 何师意, 等. 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.
- [16] 刘再华, 袁道先. 不同岩溶动力系统的碳稳定同位素和地球化学特征及其意义: 以我国几个典型岩溶地区为例[J]. 地质学报, 1997, 71(3): 281-288.
- [17] 郭建强, 彭东, 杨俊义. 松潘黄龙水循环及钙华景观成因研究[J]. 四川地质学报, 2002, 22(1): 21-26.
- [18] LI Qian-yin, FAN Chong-rong. A study of water circulation system and landscape evolution of Huanglong scenic spot[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(1): 108-112.
- [19] 魏复盛, 齐文启, 孙宗光, 等. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 王海静, 张金流, 刘再华. 四川黄龙降水氢、氧同位素对气候变化的指示意义[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 253-258.
- [21] 党政, 任锦海, 安超, 等. 7.0级地震对九寨沟核心景观和水化学影响[J]. 中国岩溶, 2019, 38(2): 186-192.
- [22] 代群威, 党政, 彭启轩, 等. 钙华天然海绵地质体多孔特性及其对水循环调节意义: 以四川黄龙为例[J]. 矿物学报, 2019, 39(2): 219-225.
- [23] Amil A, Avc P, Il A, et al. Significance of validation for karst aquifers' vulnerability assessments: Antalya Travertine Plateau (Turkey) application[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2019, 228: 103557.
- [24] Snell T, Paola N D, Hunen J V, et al. Modelling fluid flow in complex natural fault zones: Implications for natural and human-induced earthquake nucleation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 530: 115869.
- [25] 杨俊义, 万新南, 席彬, 等. 九寨沟黄龙地区钙华漏斗的特征与成因探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004(2): 90-93.
- [26] 郭建强, 彭东, 杨俊义. 松潘黄龙水循环及钙华景观成因研究[J]. 四川地质学报, 2002, 22(1): 21-26.
- [27] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and Phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [28] XIE J, STROBEL G, XU W, et al. Fungi as Architects of the Rimstone Dams in Huanglong, NSD, Sichuan, China[J]. Microbial Ecology, 2017, 73(1): 29-38.
- [29] Efthimios K Giannimaras, Petros G Koutsoukos. The crystallization of calcite in the presence of orthophosphate[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1987, 116(2): 423-430.
- [30] Yi-pin Lin, Philip C Singer. Inhibition of calcite precipitation by orthophosphate: Speciation and thermodynamic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(10): 2530-2539.
- [31] van der WEIJDEN R D, MEIMA J, COMANS R N J. Sorption and sorption reversibility of cadmium on calcite in the presence of phosphate and sulfate[J]. Marine Chemistry, 1997, 57(1): 119-132.
- [32] BURTON E A, WALTER L M. The role of pH in phosphate inhibition of calcite and aragonite precipitation rates in seawater [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(3): 797-808.
- [33] 张金流, 王海静, 刘再华. 旅游活动对黄龙景区磷酸盐浓度和水藻生长的影响[J]. 地球学报, 2011, 32(4): 463-468.
- [34] 董发勤, 李琼芳, 代群威, 等. 黄龙风景区和黄石公园钙华形成环境对比研究[C]. 中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会, 2013.
- [35] 李华举, 廖长君, 姜殿强, 等. 钙华沉积机制的研究现状及展望[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 57-62.

Characteristics of water environment changes in a short period after the "8 August 2017" earthquake in Huanglong, Xuebaoding watershed

ZHAO Xiaoxia¹, LI Qiongfang¹, DONG Faqin^{2,3}, DAI Qunwei^{3,4}, SONG Na¹, DONG Pengju¹, CUI Jie³, LUO Yaodong³, ZHANG Qiang⁵, XIN Zhang⁶, O'Driscoll Mike⁷

(1. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 4. Fundamental Science on Nuclear Wastes and Environmental Safety Laboratory, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 5. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 6. Physical & Computational Science Directorate, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99354, USA; 7. Industrial Mineral Forums & Research Ltd., Epsom, Surrey KT17 4RH, UK)

Abstract The deposition of Huanglong travertine needs water which is rich in calcium ions and hydrogen carbonations. The purpose of this study was to determine whether the 2017 Jiuzhaigou earthquake had an impact on the fragile travertine in Huanglong and caused the change of the water environment subsequently. Water samples were collected and tested at three monitoring sites in Huanglong in October 2017 and August 2018, respectively. Based on the principal component analysis of many times of water quality tests before the earthquake, the main parameters affecting the chemistry of Huanglong water were determined, and the main parameters after the earthquake were compared and analyzed. The principal component analysis of water quality parameters in 2016 show that the pH value, total phosphorus and total nitrogen played a major role in the water quality of Huanglong. The pH, Ca^{2+} and HCO_3^- contents increased, while total phosphorus content decreased after the earthquake. The results show that the earthquake has a little influence on the structure of Huanglong travertine, leading to increase of Ca^{2+} and HCO_3^- ion content in the rising spring (Zhuanhua spring), and also affected the pH value. The decrease of TP content in the water after the earthquake may be related to the decrease in the number of tourists. The analysis suggests that the earthquake has some effect on the water environment of the sedimentary area of Huanglong travertine and was favorable to the deposition of travertine.

Key words travertine, earthquake, water quality, Huanglong

(编辑 黄晨晖)