

刘馨泽, 张清明, 唐淑, 等. 黄龙五彩池源水区渗漏特征分析和人工降渗保育综合研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 33-47.

DOI: 10.11932/karst20240104

黄龙五彩池源水区渗漏特征分析和 人工降渗保育综合研究

刘馨泽¹, 张清明², 唐淑², 田长宝², 高文皓^{1,3}, 周亚萍¹, 陈洪伟¹, 韩梅东¹, 孙东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; 3. 成都理工大学材料与化学化工学院, 四川 成都 610059)

摘要: 黄龙世界自然遗产地核心景观之五彩池, 其源水区上游转花池泉群地表溢流后, 在灌丛林区中形成较为强烈的渗漏, 导致五彩池涵养水量下降, 出现一定程度退化。通过野外调查、长期监测、取样测试等手段, 查明源水区水体径流渗漏特征及原因, 分析人工降渗手段对五彩池钙华景观演化影响。结果表明: (1) 五彩池源水区河道发生了极为强烈的人渗, 造成五彩池涵养水量下降, 平均径流渗漏占比达51%, 月动态变化较小, 造成渗漏增强的原因主要为高山柳灌丛根劈、冻融等增加钙华有效孔隙度形成强渗透层; (2) 源水区强渗漏造成五彩池下游边缘出现失水黑化, 后沟地表水替换了彩池群内原有景观水体(水体置换)引发“灰化”现象; (3) 通过人工保育降低源水区强渗漏, 五彩池内涵养水量出现明显增加, 北边缘彩池群黑化消失, 东侧灰化现象减弱, 五彩池钙华水域景观范围扩大16.3%, 径流渗漏量比前期减少34%, 主要景观涵养期内, 进入五彩池的涵养水量占比由保育前的49%增加至83%, 月平均涵养水量由 $4\,892\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 增加至 $8\,674\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 涵养水量增加77%; (4) 降低源水区渗漏, 增加下游彩池群涵养水量, 对钙华水域景观范围扩大、恢复起到了明显的促进作用, 为黄龙世界自然遗产地核心价值的保护提供了重要的依据。

关键词: 转花池; 渗漏; 灌丛; 人工保育; 五彩池

创新点: 首次阐明了黄龙世界自然遗产地核心钙华水域景观(五彩池)的退化、复原与其源水区高山柳灌丛地带地表水强渗漏的关联机制。

中图分类号: P931.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0033-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

黄龙——中国著名的世界自然遗产地之一, 地处青藏高原东部边缘向四川盆地的过渡地带, 以精美的钙华彩池、滩流景观闻名于世。黄龙的钙华梯田和钙华湖泊是全亚洲独一无二的, 被列为世界3

大钙华奇观之一(联合国教科文组织世界遗产中心 UNESCO World Heritage Centre, 1992)。景观的主要源头为黄龙核心景区最上游的转花池, 一处受望乡台断层控制的大规模上升泉群, 其重要作用之一即直接控制了黄龙核心景区最重要的景观——五彩池的形成和演化, 其水量的大小决定着五彩池的规模。

基金项目: 四川省科技计划资助项目(24NSFSC0529); 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室开放基金(GHBK-2023-01); 四川省地质调查研究院科研项目(SDDY-Z2022008, SCIGS-CYBXM-2023004); 黄龙国家级地质公园水循环特征及景观保育技术研究(5132202018000229)。

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: 孙东(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工环地质领域相关科学研究及应用工作。E-mail: 67986685@qq.com

收稿日期: 2023-05-15

转花池片区现为密集高山柳灌丛区, 泉水出露后在林间穿行径流, 出现了较为强烈的渗漏现象, 五彩池钙华的规模、品质受到影响, 出现彩池群边缘失水黑化、河道侵位等诸多问题, 黄龙遗产地核心价值受到一定程度的不利影响。

针对转花池泉群、五彩池等地开展的工作主要集中于其地质成因^[1-4]、水文地球化学特征^[5-8]、水循环结构^[9-10]等, 转花池对五彩池景观形成的直接影响也仅限于“钙华源泉”一词的定性描述, 相关学者并未对转花池景观涵养能力和特征做出系统研究。高山柳灌丛区对钙华改造后, 会造成渗透性增强, 造成地表水和地下水的重新分配^[10], 进而影响被地表水体涵养的钙华景观。黄龙核心景区内因大面积的灌木增殖, 有高山柳、杜鹃等, 其中高山柳分布最广、密度最高。高山柳又称杯腺柳(*Salix cupularis*), 青藏高原上特有且分布普遍的本土树种, 为植被恢复的先锋物种, 生态适应能力强^[11], 对地表钙华有强烈改造现象, 是造成钙华表层景观退化最重要的因素之一。何佳^[11]、何露露^[12]在川西地区典型灌木对土壤理化性质影响研究中发现总孔隙度、非毛管孔隙度(有效孔隙度)显著增加, 提升土壤渗透性促进土壤内部渗流过程。代群威^[13]也提出, 钙华是一种天然海绵地质体, 具有渗水、透水等天然特性, 在植被及微生物等活动影响下, 钙华的多孔性更为明显, 并趋向松散。高山柳灌丛发育对钙华的改造是一个自然过程, 但也导致五彩池源水区发生强烈渗漏、五彩池涵养水量减少, 出现景观水域收缩, 对钙华景观的总体形态造成了不良影响。

本研究通过分析源水区渗漏特征及对其五彩池景观局部退化的影响, 并对已开展的人工保育试验进行评估, 分析降低源水区渗漏对五彩池钙华景观复原的控制成效, 为黄龙钙华自然保护、修复提供一定的支持。

1 研究区概况

黄龙景区位于中国四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县黄龙乡, 地处岷山山脉北中段, 青藏高原和四川盆地的接合部位。转花池泉群是黄龙五彩池源水区, 位于黄龙核心景区最南端望乡台终碛坡脚, 地下水主要补给源为雪宝顶、玉翠峰一带的冰雪融水和降水, 由南向北径流, 控水构造主要为雪宝顶褶皱

构造岩片, 其中望乡台次级构造岩片的北边界断层——望乡台断层, 东西向横穿黄龙沟, 控制了泉水的出露条件, 于转花池地面形成一片地下水溢出带, 以钙离子、水中二氧化碳浓度高为主要特征, 提供了钙华沉积过程中主要的钙。泉口共计 6 处, 其中 1、3、5 号泉流量较大, 6 号泉直接汇入黄龙后沟, 未进入五彩池。

转花池地处密集的灌丛区, 宽 60~90 m, 长 90~100 m, 平均径流长度 90 m。西侧边界至山前, 东侧边界至黄龙后沟河道(见大量的冰碛漂砾), 南侧边界为冰碛终碛陇, 北侧紧邻五彩池, 表层沉积厚度不大的钙华层, 孔隙密集, 植被茂密, 风化强烈。

转花池泉水溢出后, 逐渐汇聚, 向北穿越林区后进入五彩池, 提供景观源水, 在径流的过程中, 水流量、水化学均发生了一系列变化, 影响着下游五彩池的钙华生长和发育。

转花池林区东侧为由黄龙后沟地表水, 自三道坪一带开始汇集两侧溪流, 至望乡台一带, 水量为转花池泉群的 4~8 倍, 因有部分与转花池同源的地下水混入沟水, 后沟水体流经此处后具备了一定的钙华沉积能力, 形成了与五彩池差异较大的映月彩池景观。后沟地表水和转花池泉群构建了黄龙钙华景观形成演化的初始驱动力, 经历多次地表水入渗—泉水排泄循环过程后, 最终排入涪江。

2 研究手段和方法

采用野外调查、流量监测、水质监测、颗粒分析、水量调控保育试验等手段。

流量监测采用 2019 年安装的标准化测流堰箱(2 mm 薄钢板一体化焊接)。堰箱内水体平稳, 保证测量精度。因转花池 6 号泉(S6)不进入五彩池, 为分析转花池和五彩池之间的水量补给关系, 本文所提及的转花池总水量不包含 6 号泉水量(图 1)。本次设置了 5 个监测站(A1、A2、A3、A4、B)(图 1), 监测转花池总水量(A1+A2+A3+A4)、五彩池进池水量(B)及相应水化学特征变化。

流量采用人工测量, 监测频次为每月 3 次, 监测周期为 2019 年 4 月—2019 年 11 月, 12 月—3 月因为景区大雪封山无监测数据。监测流量同时进行水质监测, 获取各处水点的水化学信息。颗粒分析样品和 SEM 样品取自转花池林区散体钙华(G01)

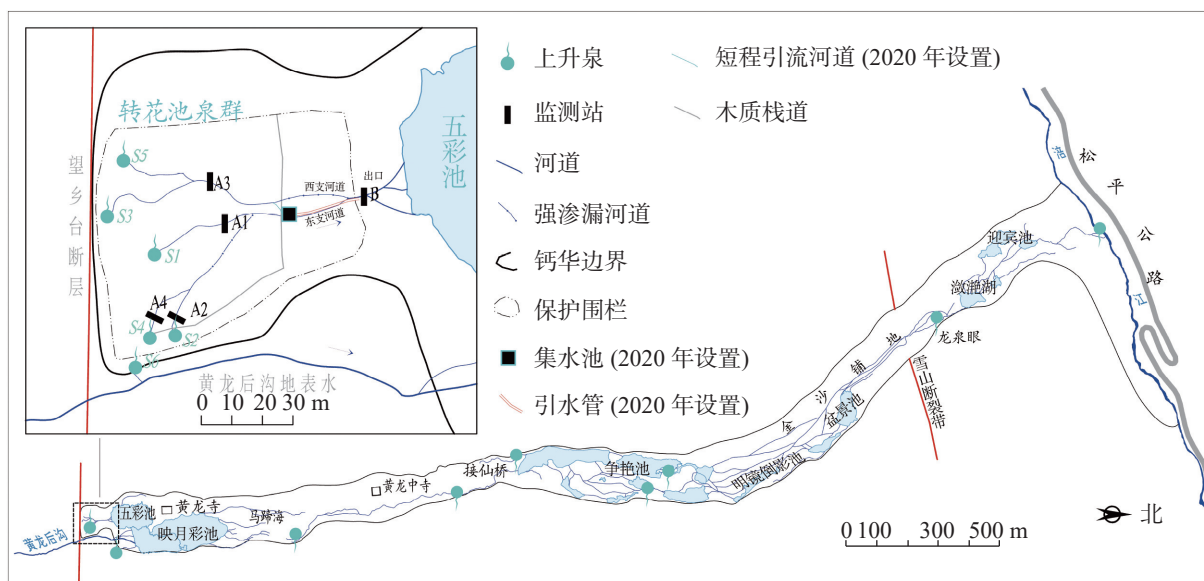


图1 研究区位置暨监测站分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of monitoring stations

和映月彩池池底新生钙华(G02),用以分析高山柳灌丛对根系对钙华孔隙的改造情况和微观形貌。流量测量采用薄壁矩形堰、三角堰。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。 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 指标取样 500 mL, 加入 5 mL 浓 HNO_3 保存剂, 遮光低温保存; SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 指标取样 500 mL, 遮光低温保存; 样品采集完毕后, 72 h 内送抵成都实验室检测。颗粒样品于黄龙乡大湾村晒干后, 使用分样筛分级筛选后称重。使用日本日立公司 SU8220 SEM 扫描电子显微镜对钙华颗粒样品的微观形貌进行表征, 参数如下: HV20kv, 扫描精度 5~50 μm , 测试单位为四川科源工程技术测试中心, 实验前将样品尺寸控制在最大直径 3 mm, 最大厚度 2 mm 内, 然后用双面胶粘贴在托盘上, 用导电银浆将样品与托盘连接, 确保良好的导电性后进行扫描。

2020 年 6 月 5 日对转花池水量进行调控, 开展了五彩池保育, 评估水量增加后对五彩池局部退化改善的影响。总体思路为上游保持原有河道、下游集水, 强渗漏地段河道进行改道及铺设聚氯乙烯薄膜降渗, 未对转花池林区灌木进行清理。在转花池木质栈道北侧, 采用废弃的栈道木板搭建了长 3 m、宽 2 m、高 1.5 m 的集水池, 上游沟道水(转花池 1、2、3、4、5 号泉水)全部汇入集水池, 集水池中部垂直安装不锈钢筛网, 用以拦截枯枝、落叶, 避免其进入五彩池。集水池接 UPVC 引水管于转花池北侧形成 2

个出水口。转花池 2、4 号泉以下河道底部铺设聚氯乙烯薄膜直至 1 号泉所在河道交叉口; 原西支河道为强渗漏地段, 自木质栈道南侧进行短程改道, 直接汇入集水池; 地表水不再流经集水池以北的西支和东支河道, 转而通过集水池和 UPVC 管路流动; 通过上述 3 种手段起到林区地表水降渗的目的。

3 结果和分析

3.1 源水区水环境特征

五彩池源水区——转花池泉水以高二氧化碳分压、高碳酸氢根、高钙为主要特征。泉群水质稳定。据 2018 年至 2020 年监测数据, 其水质基本特征如下: pH 为 6.4~6.7(平均值为 6.6), 温度为 6.2~7.2 $^{\circ}\text{C}$ (平均值为 6.7 $^{\circ}\text{C}$); 碳酸氢根浓度 715~899 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值 799 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 钙离子浓度 175~248 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值 208 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。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, 方解石饱和度 SIc 一般为 -0.83~0.15, 普遍处于未饱和状态。

转花池泉口以下, 沿河道流动产生强烈的脱气反应, 由表 1 中 2019 年 7 月和 9 月份两期水质数据, 至转花池林区出口(B 监测站)可知水中二氧化碳分压急剧下降, 损失量占比在 57%~68%, 由 15~23 kPa 下降至 6.54~7.34 kPa, 同时水中游离二氧化碳浓度降幅较大, 达 62%~78%。pH、水温、电导率基本保持不变。径流过程主要离子 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度变动较

表 1 监测站和监测对象对应关系

Table 1 Corresponding relationship between monitoring stations and monitoring objects

序号	监测站编号	作用	监测泉点	堰类型	监测站位置
1	A1	监测转花池总水量 (五彩池断面)	转花池1号泉(S1)	矩形堰	泉口下游河道
2	A2		转花池2号泉(S2)	三角堰	泉口
3	A3		转花池3号和5号泉(S3、S5)	矩形堰	泉口下游河道
4	A4		转花池4号泉(S4)	三角堰	泉口
5	B	监测五彩池进池水量	转花池出口,五彩池进口(S9)	矩形堰	泉水汇流河道出口

小,均在 10% 以内。方解石饱和指数由未饱和变为过饱和,具备钙华沉积能力。

钙华沉积主要起因于水中二氧化碳的大量释放,造成自黄龙景区内泉口向下游水中二氧化碳分压和电导率下降,pH 和方解石饱和指数(SIc)升高^[7]。在转花池内,pH 升高和电导率下降并不明显,沉积作用较弱,强烈的钙华沉积在转花池林区出口以下,

于五彩池一带发生。转花池内水体经过 90 余米的地表径流脱气,水中已有大量的碳酸钙微粉、微粒,强化了多相流体的景观水特征,以散流状进入五彩池,微粒、微粉不断继续生成,并开始在重力和流体边界层内的摩擦力作用下沉降、固结,形成新的钙华,促使边石坝不断加高(表 2)。目前,这一沉积过程仍在持续。

表 2 转花池泉群及林区出口水化学特征表

Table 2 Hydrochemical characteristics of Zhuanghuachi spring group and the outlet of forest area

监测日期	监测站	pH	水温/ ℃	电导率/ μs·cm ⁻¹	游离二氧化 碳/mg·L ⁻¹	[Ca ²⁺]/ mg·L ⁻¹	[HCO ₃ ⁻]/ mg·L ⁻¹	PCO ₂ / kPa	SIc
2019/7/20	A1	6.5	7	1 152	166.16	210	857.51	20.22	-0.09
	A2	6.4	7.1	1 146	197.69	212	808.15	23.75	-0.20
	A4	6.4	7.2	1 139	178.94	211	826.66	24.31	-0.19
	B	6.9	6.3	1 068	111.63	194	789.65	7.34	0.24
2019/9/20	A1	6.6	6.7	1 106	129.48	181	748.53	13.99	-0.10
	A2	6.5	6.9	1 105	151.63	181	748.53	17.61	-0.19
	A4	6.6	6.7	1 096	138.00	181	748.53	13.99	-0.10
	B	6.9	6.1	1 038	109.04	173	692.86	6.54	0.15

3.2 源水区渗漏特征

五彩池源水由转花池 1 号至 5 号泉水组成,泉群溢流而下在林区内东西向人工栈道下汇合,并初步形成 2 条分支河道,东支河道底部大部为裸露的、褐黄色坚硬钙华形成,渗漏较微弱;而西支河道全为强全风化的钙华层、灌丛密集根劈强烈,并存在多处滞留池水,形成了转花池地表水体发生强烈渗漏的主要部位。这两支河道在转花池近出口处又归并成 1 条,进而排入五彩池。

4 月至 11 月转花池总水流量为 3 919~12 375 m³·d⁻¹(图 2),多月平均流量 8 800 m³·d⁻¹。每年 4 月至 9 月,转花池流量动态增加,10 月份开始流量持续衰减至次年 3 月份。

转花池泉群溢流后沿着灌丛林区河道发生了极

为强烈的入渗。据图 3,钙华景观主要涵养期(7 月—11 月)内,转花池总水量为 6 637~12 375 m³·d⁻¹,平均值 9 730 m³·d⁻¹;转为五彩池的涵养水量为 3 674~5 471 m³·d⁻¹,平均值 4 718 m³·d⁻¹;径流渗漏水量为 2 993~7 262 m³·d⁻¹,平均值为 5 011 m³·d⁻¹;渗漏占比为 45%~62%,平均值 51%。

自泉群出露地至转花池出口河道平均线渗漏强度达 52.4 m³·(d·m)⁻¹,望乡台断层上升溢流至地表的泉群,径流途径中大量水体还未转化为下游钙华景观的涵养水,又重新转为地下水,最终进入五彩池的水量仅有转花池总水量的 49%(范围值 38%~55%),导致五彩池的涵养水量偏低。

转花池内径流渗漏占比丰水期略低于枯水期,月际变动范围较小(表 3),枯水期总水量下降,径流

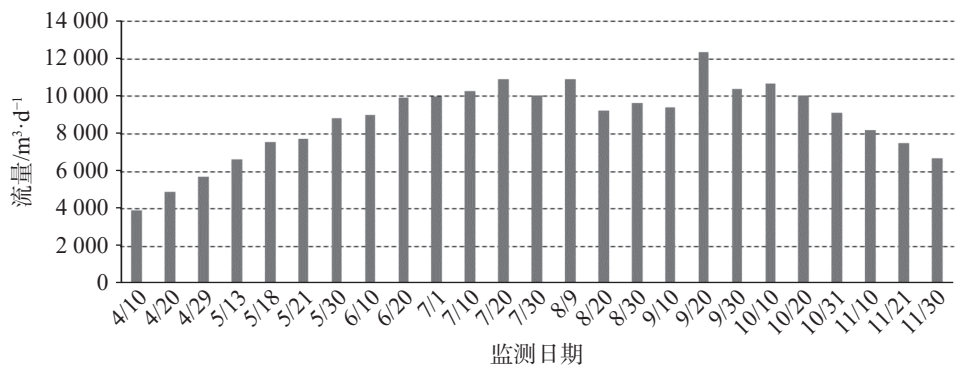


图 2 转花池总流量动态(2019 年 4 月—11 月)

Fig. 2 Dynamics of the total flow of Zhuanhua pond (April–November, 2019)

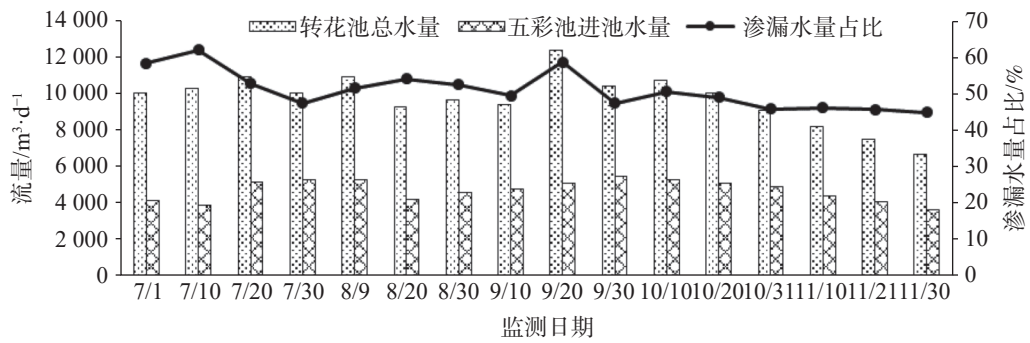


图 3 转花池总流量和五彩池进池流量变化(2019 年 7 月—11 月)

Fig. 3 Changes of the total flow in Zhuanhua pond and the inflow quantity of Wucai pool (July–November, 2019)

表 3 全月平均水量动态 (单位 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 3 Dynamics of monthly average water flow (unit: $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

年份	月份	转花池总水量	五彩池进池水量	渗漏水量	渗漏占比	入五彩池占比
2019年	7月	10 333	4 631	5 703	55%	45%
	8月	9 952	4 707	5 244	53%	47%
	9月	10 736	5 115	5 621	52%	48%
	10月	9 965	5 114	4 851	49%	51%
	11月	7 462	4 054	3 408	46%	54%
2020年	4月	3 933	1 559	2 374	60%	40%
	5月	5 912	2 939	2 973	50%	50%

渗漏占比增加至 60%(4 月)。

在自然条件下,五彩池的涵养水量最大为 $5\,115\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,一般出现在 9 月份。9—10 月,五彩池进池水量保持恒定的前提下,渗漏水量和渗漏占比仍继续下降。此阶段,转花池径流渗漏对下游钙华景观涵养的影响降至最低。

3.3 钙华景观退化分析

从源水区进入五彩池的水量决定了景观水域景观范围,水质主要决定了新生钙华沉积速率和结构。转花池泉群多年水化学特征较为稳定,至转花

池林区出口主要离子变化幅度小,水中二氧化碳脱气强烈,钙华沉积能力稳定。目前五彩池范围相对历史时期处于相对较小水平,而转花池总水量平均有 51% 未进入五彩池,渗漏明显对景观涵养能力影响大。

紧邻转花池的五彩池南部坡降极缓、北部较陡,是五彩池长期较高速率(边石坝 $4.7\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$)快速沉积的结果^[2],南部区域边石坝顶面标高越来越相近,此种趋势由南向北不断推进。五彩池南部与转花池出口高差已经极小,钙华发育已近末期,持续增高的条件已经较差,且低势能差下形成的水动力条件较

弱,为藻类滋生、泥沙杂质堆积提供了便利。从钙华景观健康发育的角度来看,五彩池南部已然没有继续增高的意义,维持现状或较低的钙华沉积速率本区域是较为适宜的,景观水较高的钙浓度主要涵养作用为形成大量水中碳酸钙颗粒悬浮物,形成蓝色水体景观。

在较长时期内,转花池仅有一半左右水量进入五彩池,迫使五彩池水域范围出现一定程度的收缩,边缘地带失水出现黑化彩池群。钙华表层黑化初期

仍基本保持原有结构强度,出现铁锰元素富集^[14],其形态与北京大学鲁安怀(2019年)提出的强日照喀斯特地区地面普遍出现的富锰“矿物膜”较为相似,存在复杂矿物与微生物交互作用过程。黑化层后期出现灌木丛因根系改造结构趋于松散进而出现渗漏增强。失水黑化主要位于黄龙后洞至五彩池北边界。黑化区(图4中a区域)包含12个彩池共计810 m²,高山柳灌丛正在不断扩展,形成失水—黑化—灌丛化的退化链条。

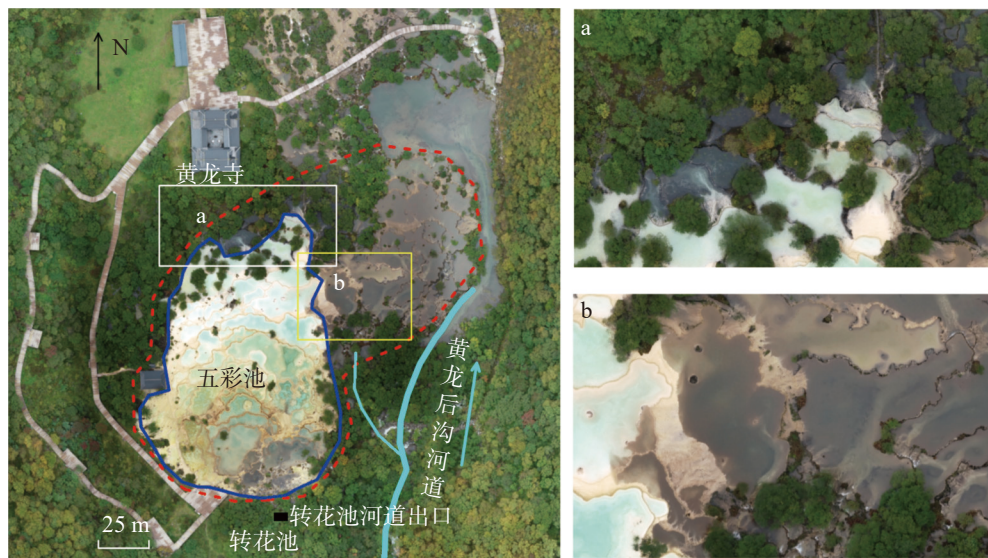


图4 五彩池水域景观区收缩及次生退化现象(据2019年8月无人机航测影像)

(蓝色线为现今范围,红色为早期范围 a. 失水黑化区 b. 水体置换灰化区界线附近)

Fig. 4 Shrinkage and secondary degradation of Wucai pool in the landscape area (based on UAV aerial survey images in August, 2019)

(blue line: the present range. red line: the range in the early time a. water loss and blackening area b. the podzolization area near the boundary line of water displacement)

天然条件下,转花池丰水期(7—9月)平均涵养水量 $4\,818\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ (范围值 $4\,631\sim5\,115\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)。以五彩池丰水期最大充水彩池群范围为涵养面积(图4蓝线范围),由无人机航片上测量面积为 $9\,041\text{ m}^2$,彩池平均渗漏强度为 0.562 m^{-1} (黄龙管理局科研处2016—2018年实测数据平均值),计算涵养水量为 $5\,081\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,与转花池的最大涵养水量($5\,115\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)近乎相同。图4中红线为现残存钙华边石坝边缘,为五彩池早期范围,面积 $17\,903\text{ m}^2$,几乎为现天然范围的2倍,按照现今彩池渗漏强度($0.562\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$)估算,早期五彩池涵养水量 $10\,061\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,转花池总水量丰水期最大可达 $12\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以上,4—11月多月平均水量为 $9\,730\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,具备形成此规模彩池群的条件。后期因转花池林区内渗漏增强,五彩池内涵养水量

下降,无力维持规模较大的彩池群,下游水域边界后退,除了造成边缘处钙华彩池黑化,还导致东侧河道水体被黄龙后沟地表水置换,形成特殊的彩池“灰化”现象。

五彩池东侧出现“灰化”主要原因为置换后的景观水体—地表溪沟水携带泥沙含量较重、钙浓度相对较低、藻类滋生明显。后续新生钙华颜色也由白色、淡黄色变成灰褐色调,钙华沉积速率相对降低。钙华“灰化区”总面积达 $6\,630\text{ m}^2$ 以上。

综合来看,因为历史上转花池涵养水量下降,钙华彩池“灰化”影响规模要大于黑化。五彩池东边界至少后退了 200 m ,北边界后退了 $17\sim48\text{ m}$ 。同时高山柳灌丛也随着黑化彩池一道不断推进,形成“水退林进”的局面。

3.4 源水区渗漏成因分析

高山柳灌丛极大程度促进了钙华解体并形成松散强渗介质的过程。转花池一带密集生长高山柳另有少量杜鹃灌丛,原有表层钙华已经完全退化,除径流沟道可见钙华,其余均被灌木、苔藓覆盖。高山柳为核心营力,对钙华进行了充分的结构改造,从而转化为以有效孔隙度较高并夹灌丛根系形成的大孔隙的钙华土体,渗透性大为增强,造成径流沿途渗漏。

高山柳根系以厘米级主根垂直劈入钙华,而后以细密的根系横向生长扩展并在深度 30~50 cm 接连成网,进行显著的穿插物理破坏。灌丛区表面的落叶层(腐殖质层)中微生物活动强烈,进行着有机质的积聚或分解的转化过程。钙华体在根系和落叶层的作用下,不断解体并向土壤转化。黄龙地处青藏高原东缘高寒山区,为季节性冻土区,最大土壤冻结深度一般 50 cm 左右^[15-16],反复冻融下,进一步促进灌丛区钙华产生更为均匀性的结构破坏,并促进成土过程。转花池灌丛区内钙华包气带含水量高,容易形成大量冰晶挤压钙华孔隙。当膨胀应力大于钙华体的抗拉强度时,便会产生细小裂缝,造成不可

逆的结构破坏。多年冻融循环会导致钙华体内裂缝持续扩展、连通,渗透性增强。据陈四利对水泥土的冻融试验^[17],介质渗透系数随着冻融循环次数的增加而增大,钙华体内部也发生了类似的过程。

据转花池内典型 60 cm 深度探槽剖面,钙华已解体离散成完全松散之钙华砾、钙华砂层,由上而下为①落叶苔藓层,底部为黑色有机质土(厚 7 cm);②白色层状多孔钙华(厚 18 cm),夹灌丛粗大根孔;③灰褐色钙华砾、砂土(厚 35 cm),夹大量灌丛细密根系。据相关研究成果,高山柳灌丛等植被恢复过程中,主要产生影响的土壤层位(根系密集层)为 40~60 cm 以浅^[18-19],转花池钙华风化情况也总体符合本特征。大体在 60 cm 范围内,原生钙华基本消失,而成为次生松散堆积物。明显受较为均匀破坏的钙华层厚度与最大冻结深度(<50 cm)具有一定的一致性。

黄龙景区灌丛根系活动对钙华结构的改造是显著的。原有胶结良好的钙华在根劈作用等的引导下,先呈散块状,而后逐步离散,最终形成松散的钙华砾、钙华砂,此时其颗分特征和彩池底部刚形成的松散重力堆积型钙华一致(表 4),粒径一般大于 0.25 mm。

表 4 灌丛根系完全改造后的钙华颗分布特征

Table 4 Distribution characteristics of travertine particles in thicket root system after transformation

位置	类别	粒径/mm	重量/g	占比/%	颗粒名称*
转花池	灌木根系完全破坏后的钙华	>2	142.32	36.7	砾
		0.25~2	138.04	35.6	中粗砂
		0.075~0.25	82.88	21.4	细砂
		<0.075	24.35	6.3	粉粒
映月彩池	彩池底初成未固结钙华	>2	158.47	34.7	砾
		0.25~2	112.15	24.6	中粗砂
		0.075~0.25	155.59	34.1	细砂
		<0.075	30.07	6.6	粉粒

*: 据土的工程分类标准(GB/T 50145-2007)确定。
*: based on the engineering classification standard of soil (GB/T 50145-2007)。

据 SEM 图片(图 5),被灌丛充分改造的钙华在粉粒区至砾、砂区均发现灌木根须存在,说明根劈作用的尺度从厘米级一直作用到微米级,对钙华原生孔隙结构的破坏是较全面且剧烈的。

钙华的原生孔隙结构由碳酸钙微粒堆积、微生物活动、气体扩散而成,后两种为微米至纳米级的超微-微孔隙,微粒堆积孔隙直径 1~500 μm,为钙华孔隙结构的主体,贯通良好,构建了地下水渗透运移的

主要通道^[13],这是钙华天然具备透水能力的物理结构基础。高山柳根系改造过程中,原钙华体的细小孔隙、孔洞逐渐被根劈形成的裂缝和松散颗粒间大孔隙代替,成为强渗漏的松散堆积层,控制渗流的主要水动力参数发生较大的变化(表 5)。

完整钙华体完全解体后,形成松散的钙华砾后,孔隙度增加,有效孔隙度和渗透系数达到最大。相比正常钙华,钙华砾渗透系数提高了 4.9 倍(1.53 m·d⁻¹

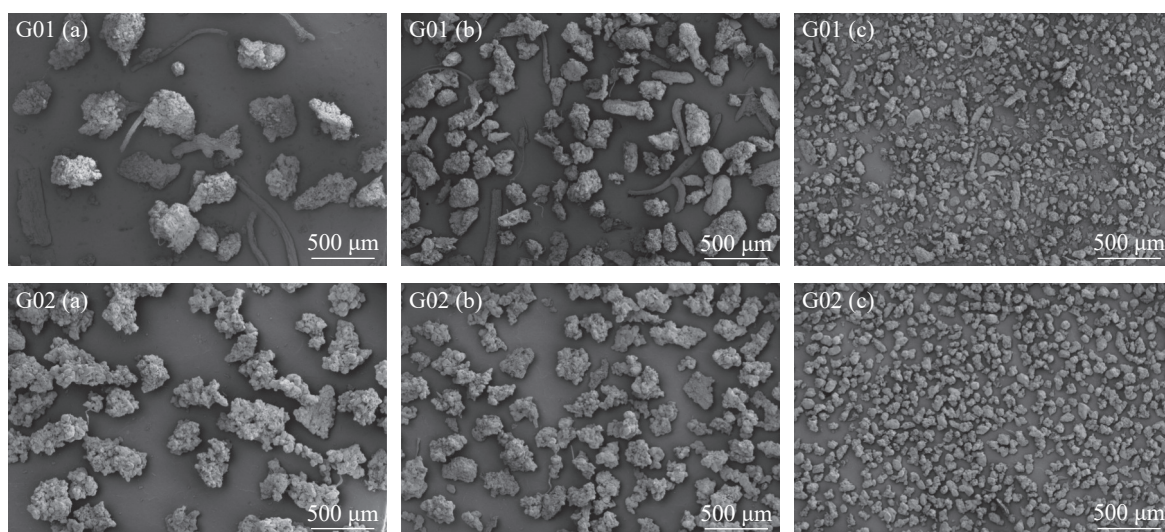


图 5 灌丛充分破坏后的钙华颗粒样品 SEM 图片

G01. 转花池样品 G02. 映月彩池样品 (a. 粒径 0.147–0.250 cm b. 粒径 0.075–0.147 mm c. 粒径 <0.075 mm)

Fig. 5 SEM images of travertine samples after full destruction of thicket

G01: sample of Zhuanhua pond G02: sample of Yingyue pool (a. particle size 0.147–0.250 cm b. particle size 0.075–0.147 mm c. particle size <0.075 mm)

表 5 钙华松散过程主要水动力参数变化*

Table 5 Main hydrodynamic parameters of travertine loosening process

类型	松散颗粒特征	渗透系数 / $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	有效孔隙度 /%
钙华砾	2~20 mm	9.09	14.2
钙华砂	0.075~2 mm	5.41	12.5
钙华粉粒土	<0.075 mm	2.81	10.6
正常弱溶蚀钙华	胶结	1.53	8.1

*: 数据来源为2019年成都理工大学生态环境学院水力学实验室完成的达西土柱渗流试验。

*: The data source is derived from the Darcy seepage test of soil column completed by the hydraulic laboratory of College of Ecological Environment, Chengdu University of Technology in 2019.

增加至 $9.09 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$), 有效孔隙度提升了 75% (8.1% 增加至 14.2%)。

一般来说, 胶结作用消失的钙华土质地越粗, 透水性越强, 与普通土壤质地和透水能力的关系一致^[20]。土壤孔隙特征是改变土体渗透能力的主导因素^[21]。对不同类型土壤入渗过程相关控制条件的研究工作中发现, 对土壤入渗能力起到显著控制作用的指标为土壤容重、非毛管孔隙度 (有效孔隙度)、总孔隙度、土壤裂隙等, 其中对土壤稳定入渗能力起到极显著控制作用的主要为非毛管孔隙度 (有效孔隙度)^[22-28]。直径 >0.25 mm (中粗砂及以上粗粒物质) 的水稳性团聚体含量增加显著提高松散土壤入渗速率^[29], 对有效孔隙度的影响最大, 而松散钙华中粗砂及砾的重量含量普遍大于 60% 以上, 对钙华土体的渗透性增强起到重要控制作用。

植被的生长活动明显提高土壤孔隙度, 非毛管

孔隙度提升强于毛管孔隙度, 土壤孔隙度与植被盖度呈极显著正相关关系^[23]。经过高山柳灌丛的根系改造, 钙华体颗粒微间隙结构发生变化, 主要为扩大孔喉、提升孔隙度和孔隙连通性, 有效孔隙度因松散程度增加而增加, 原微小的毛管孔隙大量转为裂隙和非毛管孔隙, 其中运移的水为重力水, 在水头驱动下向钙华体深部的含水层运动, 非毛管孔隙可快速容纳土体渗流并及时下渗^[30], 造成河道内地表景观水渗漏增强。高山柳等灌丛根尖向周围的钙华体施加轴向压力^[31]形成裂缝、孔洞并扩大, 密集根系在钙华体中生长发育, 土体因而会产生疏松效果^[32], 根系小于 2 mm 的细根密度高, 可有效改善钙华体内的小孔隙连通性^[33], 提高有效孔隙度。灌丛较大的根系穿插形成的大量根孔, 连续且贯通良好, 孔隙内地下水流速变大, 形成大孔隙引导的优势水流^[34]。灌木根劈、灌丛凋落叶片分解及其中的微生物活动等促

进大孔隙产生^[32],大孔隙内运动阻力小,流速增加,渗流断面平均渗透流速增加,进而增加钙华土体的导水能力。据相关研究验证,半径在 1 mm 以上的大孔隙土壤水渗漏显著增强,相关系数达 0.9 以上^[35]。

转花池片区内钙华基本由高山柳灌丛等改造为松散高渗透性粗粒堆积物,并有大量灌丛根孔形成的优势导流通道,这决定了水流流经本区域必然发生强渗漏,其中以转花池西部渗漏相对强烈。转花池栈道以北的河道特征有所不同,东支河道部分存在较为坚硬褐黄色钙华,而西支河道均为松散钙华砾、砂层。在枯水期,东支河道有流速较快的地表径流涵养,冻融作用影响小,西支河道流量极小乃至断流,砾、砂层内在冬季形成大量冰晶,促进钙华进一步疏松。西支河道深度较浅,并和西侧的退化彩池群连通,进一步强化地表水渗漏。

钙华体内灌丛盖度越大,孔隙结构被改造越强烈。转花池灌丛已经完全覆盖,灌丛发育已到老年期^[36],对钙华渗漏的影响基本达到最大,原钙华彩池表层结构几被破坏殆尽,此时渗漏强度已经增至最高,参照迎宾池一带,老年期灌丛区典型彩池渗漏强度 $14.4 \text{ m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$,与灌丛区正常钙华平均水平($1.29 \sim 1.53 \text{ m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$)相比,提升约 8~10 倍。

3.5 五彩池保育分析

3.5.1 水量调控和降渗分析

五彩池的局部退化现象是源水区进入本区总水量下降而起,由径流渗漏控制。基于此,2020 年 6

月 5 日开始将转花池内强渗区河道截流,以集水池汇集转花池 1 号至 5 号泉水,集水池以下地表水不再流经西支河道与东支河道,由引水管引至转花池林区出口。

水量调控后(图 6),五彩池入池水量占比由 4—5 月的 47.4% 增加至 75.9% (2020.6.10),并继续升高稳定在 83% 左右,径流渗漏大为降低。6—10 月涵养水量已经增加至 $5\,909 \sim 9\,560 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,最低水量已经高于天然条件下最高平均水平(9 月, $5\,115 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)。

以 2019 年和 2020 年 7—10 月为对照期,水量调控前,五彩池多月平均涵养水量 $4\,892 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,占转花池总水量 49%。水量调控后,多月平均涵养水量快速增加至 $8\,674 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,占转花池总水量 83%,涵养水量增加 77%。图 7 中,2020 年降水量相对 2019 年增加,2021 年降水量低于 2019 年水平,自 2020 年保育之后,五彩池丰水期的平均进池水量稳定维持在 $6\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,景观水域边界未再次发生后退,降水量的年度动态未产生显著影响。

保育后,集水池以北无水量渗漏,以入池水量占比 83% 为评估基准,发生在泉口测流站至集水池之间的径流渗漏占比为 17%,主要渗漏段为 A3 监测站所在的西支河道(为松散钙华砂河床)上游,因 A1 所在河道为渗漏较低的致密钙华、A2、A4 所在河道流量较小,且底部进行了临时防渗处理。原总径流渗漏(含西支、东支河道)占比为 51%,计算可得人工栈道以北的径流渗漏占比为 $51\% - 17\% = 34\%$ 。可知,人工栈道以北渗漏最强烈,占总损失的 67%,转花池

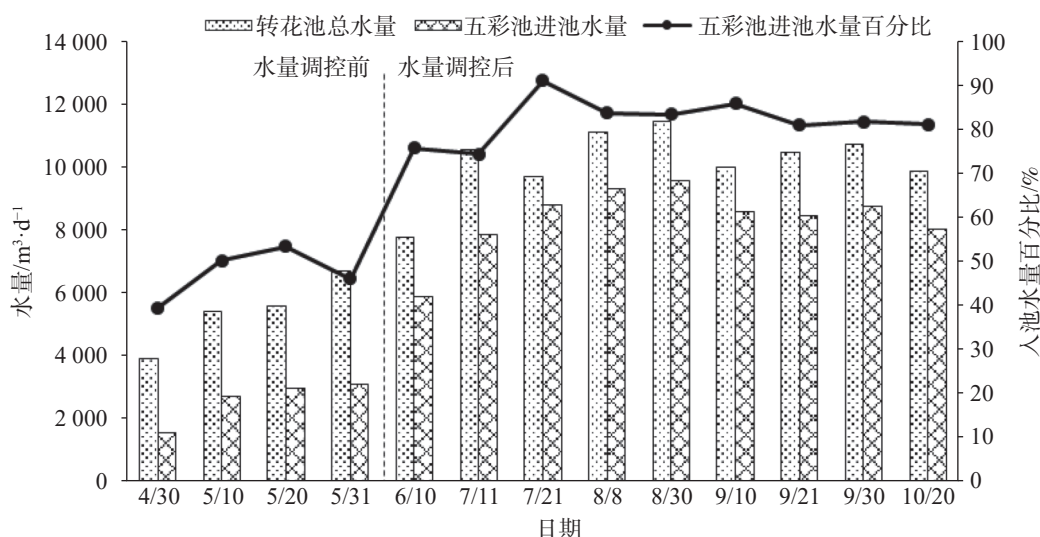


图 6 水量调控前后五彩池涵养水量变化(2020 年)

Fig. 6 Change of water quantity in Wucai pool before and after water flow regulation (2020)

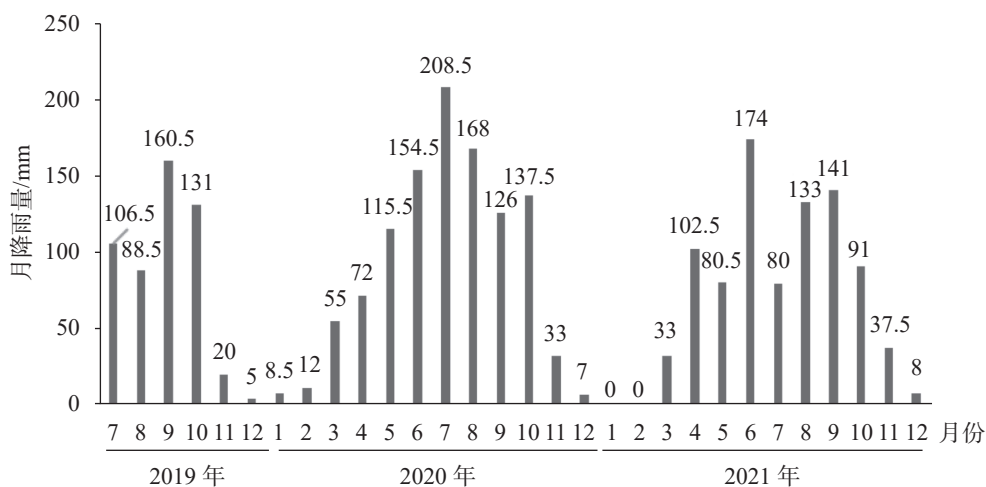


图 7 研究区 2019—2021 年降水分布

Fig. 7 Precipitation distribution from 2019 to 2021 in the study area

西支河道一带为发生地表水渗漏的主要区域,通过水量调控避开强渗漏区,降低了 34% 的渗漏损失。

3.5.2 保育后水环境变化

涵养水量增加后,转花池出水口水质与保育试验启动之前相比:钙、重碳酸根离子浓度有所增加,SIc 由过饱和变为平衡,水中二氧化碳分压有明显提升,天然情况下一一般为 6~7 kPa,保育后升高至 12.18 kPa,与 2019 年同期相比,提升了 60% 以上。

保育前后,五彩池中上游总体体现为钙华快速

沉积区(距南部入口 90 m 处以南区域),在此区间重碳酸根和钙离子基本呈线性降低(见图 8),为快速沉积段,其成分转为钙华沉积。五彩池下游,离子浓度降低相对减缓或维持原有水平,钙华沉积速率基本未发生变化。从五彩池的钙华形态分布来说,也可印证这一论述:中上游水流急速,强化了二氧化碳脱气作用,钙华彩池规模较大,边石坝高度在最大可达 1 m 左右,下游水流缓慢、彩池边石坝高度不超过 0.3 m。

据表 6,2019 年 7 月至 11 月,五彩池南部入口钙、重碳酸根离子浓度稳定,受季节影响较小,钙浓度低

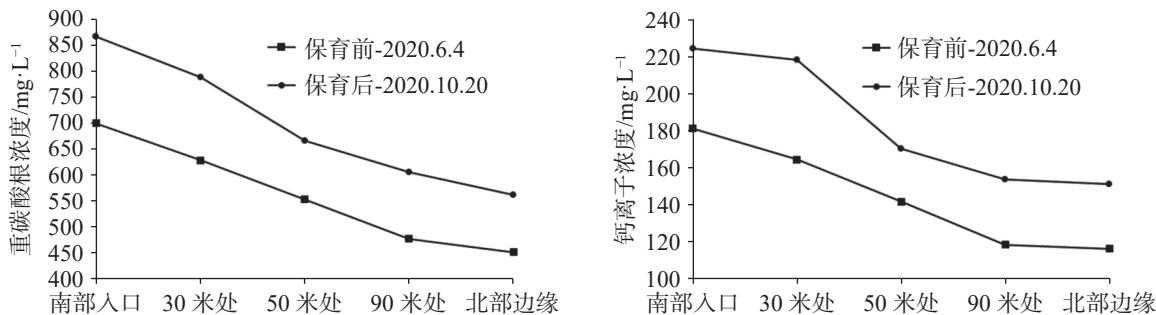


图 8 五彩池内不同部位主要离子浓度变化特征

Fig. 8 Variation characteristics of main ion concentrations in different parts of Wucai pool

表 6 五彩池南部入口水质动态 (2019 年)

Table 6 Dynamics of water quality at the southern inlet of Wucai pool (2019)

日期	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	pH	水温/ $^{\circ}\text{C}$	电导率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	$[\text{Ca}^{2+}] / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$[\text{HCO}_3^{-}] / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{PCO}_2 / \text{kPa}$	SIc
2019-7-20	5 149	6.9	6.3	1 068	194	790	7.34	0.24
2019-8-20	4 243	7	6.4	1 052	190	718	5.32	0.30
2019-9-20	5 113	6.9	6.1	1 038	173	693	6.54	0.15
2019-10-10	5 292	6.9	6.2	1 033	177	708	6.7	0.17
2019-11-10	4 414	7	5.9	1 083	196	789	5.83	0.34

于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 重碳酸盐浓度低于 $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 方解石饱和指数(SIc)亦基本稳定在 0.2~0.3 之间。2020 年保育期内(6 月至 10 月), 五彩池南部入口的离子浓度动态变化明显, 钙离子浓度动态变化由 2019 年的 $23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 2020 年的 $43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 重碳酸盐浓度变化由 2019 年的 $97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $167 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 人工保育对五彩池入口水质起到了一定的提升, 从而增强了五彩池景观区内的水体水质。

保育后, 五彩池范围内控制钙华沉积的主要离子浓度呈现整体增加(图 8), 沉积区内二氧化碳脱气增强, 方解石过饱和程度增加, 主要沉积区内平均 SIc 由 0.46 增至 1.12, 局部出现钙华沉积加速。保育试验稳定后第四个月(2020 年 10 月), 五彩池的钙华沉积出现了新的平衡: 中上游(30 m 至 50 m 处)钙华沉积加速, 钙离子浓度下降幅度由 $22.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 上游南部五彩池入口处钙华沉积速率略有下降, 其余部分未有明显变化, 与脱气范围延长有一定关系。

3.5.3 彩池景观变化

保育后, 五彩池主要涵养期(7—10 月)平均水量增加至 $8\,674 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 与保育前最大景观涵养水量 $5\,115 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 相比, 涵养水量增加了 $3\,559 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 并在 4 个月(2020.6-2020.10)内快速完成了对五彩池边缘退化地段钙华景观(黑化和部分灰化)的自然恢复(图 9)。

五彩池增加的景观水体一部分继续向北流动, 形成新生白色钙华覆盖黑化彩池区, 另一部分向东分流进入“灰化”彩池群(现映月彩池区, 原为五彩池一部), 提升水质, 彩池形态由灰褐色转为白色、淡黄色(图 10)。

降低转花池径流渗漏, 提升入五彩池水量, 对提高五彩池的景观涵养具有显著作用。五彩池北部黑化彩池渗漏强度为 $1.34 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 恢复面积为 811 m^2 , 涵养水量为 $1\,087 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; 灰化缓解区彩池渗漏强度为 $1.53 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 恢复面积为 952 m^2 , 涵养水量 $1\,457 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; 恢复部分总涵养水量为 $2\,544 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 占据五彩池总涵养水量的 29%, 剩余 $1\,015 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 水量以分散流水进入彩池群边缘灌丛区。综上计算, 总计 $7\,659 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的水量可维持当前 $10\,840 \text{ m}^2$ 五彩池景观水域范围, 相对于保育前, 五彩池范围增加了 16.3%, 目前保持稳定。

钙华彩池群为地表水向地下入渗的单元, 五彩

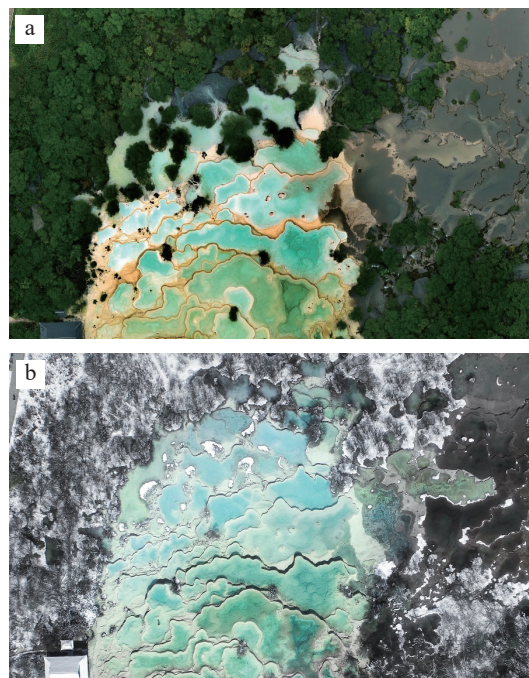


图 9 五彩池局部退化景观恢复对照

a. 保育前, 2019 年 8 月 b. 保育后, 2020 年 10 月

Fig. 9 Comparison before and after restoration of local degraded landscape in Wucai pool

a. pre-conservation, August 2019 b. post-conservation, October 2020

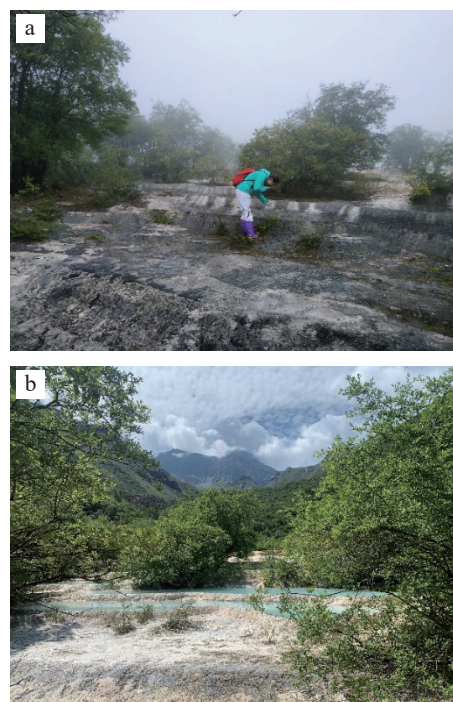


图 10 五彩池北部黑化彩池恢复对照

a. 保育前, 2019 年 8 月 b. 保育后, 2021 年 8 月

Fig. 10 Comparison of the blackened pool in the north of Wucai pool before and after conservation

a. before conservation, August, 2019 b. after conservation, August, 2021

池涵养水量增加后,彩池群扩大,但总水量仍被限制于彩池内,涵养钙华景观的同时持续转成地下径流。原在五彩池源水区直接渗漏的地表水,现转为在五彩池地段又重新渗入地下,未对黄龙核心景区总体水循环造成影响。截至 2023 年 7 月,五彩池景观在人工保育下总体形态良好。

4 结 论

(1)因灌丛区内根系活动及冻融影响,转花池内发生较强烈的径流渗漏,总水量仅有 49% 左右可以进入五彩池,形成景观涵养水源。主要强烈渗漏部位为转花池内由松散钙华砾、砂组成的西支河道。

(2)源水区渗漏造成五彩池涵养水量相对下降,五彩池出现北部边缘彩池失水黑化和东侧水体被黄龙后沟地表水置换形成“灰化”彩池群。早期五彩池面积约为现在的 2 倍左右。现状五彩池天然最大景观涵养水量一般出现在 9 月份,为 $5\,115\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

(3)通过人工保育,降低了源水区河道渗漏对五彩池景观影响。主要景观涵养期内,转花池进入五彩池涵养水量占比由保育前的 49% 增加至 83%,月平均水量 $4\,892\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 增加至 $8\,674\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,涵养水量增加 77%。转花池出口保育前后,钙、重碳酸根离子浓度变动很小,SIc 由过饱和变为平衡,五彩池内二氧化碳脱气增强。五彩池内钙华沉积能力总体得到增强。

(4)主要景观涵养期内,保育后月平均涵养水量增加了 $3\,559\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,其中完成五彩池北部黑化彩池恢复、东部灰化缓解所耗水量为 $2\,544\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,占五彩池总涵养水量的 29%,4 个月内完成景观恢复保育,五彩池景观水域范围增加了 16.3% 并保持稳定。

(5)相对保育前,涵养水量增加部分在五彩池彩池群内又重新完全入渗回归地下,对水循环结构未造成影响。因转花池西侧河道为强渗漏区,后续建议利用钙华生态修复材料或水动力修复手段对此处进行降渗,复原低渗河道,由人工保育变为自然保育。

(6)建议开展源泉脱气过程对五彩池钙华沉积影响的研究。

参考文献

[1] 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.

GUO Jianqiang, PENG Dong, YANG Junyi. A study of water circulation and genesis of travertine landscape in Huanglong[J]. Acta Geologica Sichuan, 2002, 22(1): 21-26.

[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] 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.

[4] 刘再华, K Yoshimura, Y Inokura, M Noto, 曹云. 四川黄龙沟天然水中的深源CO₂与大规模的钙华沉积[J]. 地球与环境, 2005, 33(2): 1-10.

LIU Zaihua, K Yoshimura, Y Inokura, M Noto, CAO Yun. Deep-source CO₂ in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sichuan, China[J]. Earth and Environment, 2005, 33(2): 1-10.

[5] 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.

[6] 刘再华,袁道先,何师意,张美良,张加桂. 地热CO₂-水-碳酸盐岩系统的地球化学特征及其CO₂来源:以四川黄龙沟、康定和云南中甸下给为例[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(2): 209-214.

[7] 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, SHUN Hailong, AN Dejun, TANG Shu, ZHANG Qingming. Hydrochemical variations of Huanglong spring and the steam in Huanglong Ravine, Sichuan Province[J]. Geochimica, 2009, 38(3): 307-314.

[8] 王海静,张金流,刘再华,台永东. 基于水化学和同位素特征的四川黄龙沟泉群分类研究[J]. 地球学报, 2011, 32(3): 367-372.

WANG Haijing, ZHANG Jinliu, LIU Zaihua, TAI Yongdong. Classification of spring groups based on hydrochemical and isotopic features of Huanglong Ravine[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(3): 367-372.

[9] 李前银,范崇荣. 黄龙景区水循环系统与景观演化研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(1): 108-112.

LI Qianyin, FAN Chongrong. A study of water circulation sys-

- tem and landscape evolution of Huanglong Scenic Spot[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(1): 108-112.
- [10] 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, TANG 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.
- [11] 何佳, 胡玉福, 舒向阳, 王琴, 贾安都, 严星. 川西北高寒沙地不同年限高山柳土壤生态化学计量及储量变化特征[J]. *草业学报*, 2018, 27(4): 27-33.
- HE Jia, HU Yufu, SHU Xiangyang, WANG Qin, JIA Andu, YAN Xing. Effect of *Salix cupularis* plantations on soil stoichiometry and stocks in the alpine-cold desert of northwestern Sichuan[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(4): 27-33.
- [12] 何露露, 庞学勇. 川西亚高山4种典型灌丛土壤持水能力及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(3): 632-638.
- HE Lulu, PANG Xueyong. Soil water holding capacity of four typical shrub islands and its influencing factors in subalpine western Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(3): 632-638.
- [13] 代群威, 党政, 彭启轩, 董发勤, 李琼芳, 罗尧东, 王富东, 赵学钦, 安德军, 张清明. 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.
- DAI Qunwei, DANG Zheng, PENG Qixuan, DONG Faqin, LI Qiongfang, LUO Yaodong, WANG Fudong, ZHAO Xueqin, AN Dejun, ZHANG Qingming. Porosity of travertine natural sponge geological bodies and its significance in regulating water circulation: A case study of travertine at Huanglong Ravine, Sichuan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2019, 39(2): 219-225.
- [14] Liu Xinze, Gao Wenhao, Zhang Weizhen, Zeng Ying, Zhao Songjiang. XR, XRD, FT-IR and SEM analysis the blackened travertine research in Huanglong: A world natural heritage Sichuan China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2022, 31(10): 10279-10286.
- [15] 陈博, 李建平. 近50年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征[J]. *大气科学*, 2008, 32(3): 432-443.
- CHEN Bo, LI Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(3): 432-443.
- [16] 王冰泉, 冉有华. 中国西北、西藏和周边地区1961—2020年每十年1 km季节冻土最大冻结深度数据集[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(11): 1137-1145.
- WANG Bingquan, RAN Youhua. Decadal dataset of the seasonal maximum freezing depth with 1 km resolution from 1961 to 2020 in Northwest China, Tibet and surrounding area[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(11): 1137-1145.
- [17] 陈四利, 史建军, 于涛, 黄杰. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(2): 343-349.
- CHEN Sili, SHI Jianjun, YU Tao, HUANG Jie. Effect of freezing-thawing cycle on the mechanical behaviors of cemented soil[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(2): 343-349.
- [18] 谢欢欢. 高山柳(*Salix paraqpleisia*)修复对高寒沙化草甸土壤理化性质和植被的影响[D]. 绵阳: 绵阳师范学院, 2018.
- XIE Huanhuan. Effects of *Salix paraqpleisia* restoration on soil properties and vegetation in Alpine desertified meadow[D]. Mianyang: Mianyang Teachers' College, 2018.
- [19] 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 华娟. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 636-642.
- LIANG Xiangfeng, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, HUA Juan. Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling forest area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 636-642.
- [20] 费良军, 谭奇林, 王文焰, 张建丰. 充分供水条件下点源入渗特性及其影响因素[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(2): 71-75.
- FEI Liangjun, TAN Qilin, WANG Wenyan, ZHANG Jianfeng. Infiltration character and influential factor of point source under adequate water supply[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(2): 71-75.
- [21] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 方堃. 西南喀斯特地区土壤饱和导水率及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(5): 74-76, 86.
- LI Xiaoliang, CHEN Xiaomin, ZHOU Lianchuan, FANG Kun. Soil saturated hydraulic conductivity and its influential factors in southwest karst region of China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(5): 74-76, 86.
- [22] 何苗苗, 刘芝芹, 王克勤, 雷祖团. 滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 181-187.
- HE Miaomiao, LIU Zhiqin, WANG Keqin, LEI Zutuan. Soil infiltration characteristics and influencing factors under different vegetation cover types in Dianchi lake basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 181-187.
- [23] 李青林, 杨静, 王琨, 王彪, 严令斌. 不同植被类型人工绿地土壤饱和导水能力、持水特征的比较[J]. *土壤通报*, 2021, 52(4): 828-835.
- LI Qinglin, YANG Jing, WANG Kun, WANG Biao, YAN Lingbin. Comparison of saturated water carrying capacity and water holding capacity of artificial green land with different vegetation types[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4): 828-835.
- [24] 印家旺, 阿拉木萨, 苏宇航, 蒋绍妍. 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 90-98.
- YIN Jiawang, ALA Musa, SU Yuhang, JIANG Shaoyan. Comparative study on soil infiltration characteristics of different land use types in Horqin sandy land[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4): 90-98.
- [25] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. *中国农学*

- 通报, 2008, 24(7): 494-499.
- LV Gang, WU Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 494-499.
- [26] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16-18, 78.
- WU Faqi, ZHAO Xining, SHE Diao. Analysis on affecting factors of soil infiltration in slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(1): 16-18, 78.
- [27] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils[J]. *Agricultural Water Management*, 1993, 24(1): 39-47.
- [28] 张永涛, 杨吉华, 夏江宝, 李红云, 王贵霞. 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 123-126.
- ZHANG Yongtao, YANG Jihua, XIA Jiangbao, LI Hongyun, WANG Guixia. Study on soil promotion character under different condition in stone hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(4): 123-126.
- [29] 蒋定生, 黄国俊, 谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. *水土保持通报*, 1984(4): 7-9.
- [30] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 王玉杰, 石健, 程云. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 106-109.
- SUN Yanhong, ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, WANG Yujie, SHI Jian, CHENG Yun. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 106-109.
- [31] 王力, 邵明安, 王全九. 林地土壤水分运动研究述评[J]. *林业科学*, 2005, 41(2): 147-153.
- WANG Li, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu. Review on soil water movement in forestland[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(2): 147-153.
- [32] 汪璇, 杜树汉, 邓利梅, 朱万泽, 刘刚才. 土壤不同孔隙度对川西典型植被系统水源涵养的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2023, 21(1): 19-28.
- WANG Xuan, DU Shuhan, DENG Limei, ZHU Wanzhe, LIU Gangeai. Effects of different soil porosity on the water conservation of typical vegetation system in western Sichuan[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(1): 19-28.
- [33] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 何淑勤, 文毅, 干晨兵. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 33-36.
- LIN Daijie, ZHENG Zicheng, ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, HE Shuqin, WEN Yi, GAN Chenbing. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 33-36.
- [34] 何常清. 岷江上游两种典型森林群落生态水文特征研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- HE Changqing. The ecohydrological characteristics of two typical forests in the upper reaches of Minjiang river[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [35] 陈凤琴, 石辉. 缙云山常绿阔叶林土壤大孔隙与入渗性能关系初探[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 30(2): 350-353.
- CHEN Fengqin, SHI Hui. A primary study on the relation of soil macropore and water infiltration in evergreen broad-leaved forest of Jinyun mountain[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 30(2): 350-353.
- [36] 徐文兵, 赵敏, 瓦勒塔, 施颖, 胡廷花, 于应文. 青藏高原东北缘3种灌木数量性状、龄级结构及自疏特征[J]. *草业科学*, 2019, 36(5): 1207-1214.
- XU Wenbing, ZHAO Min, Waleta, SHI Ying, HU Tinghua, YU Yingwen. Quantitative traits, age structure and self-thinning rule of three shrubs on northeast edge of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(5): 1207-1214.

Comprehensive study on characteristics of leakage in the source water area and landscape conservation by artificial leakage reduction of Huanglong Wucai pool

LIU Xinze¹, ZHANG Qingming², TANG Shu², TIAN Changbao², GAO Wenhao^{1,3},
ZHOU Yaping¹, CHEN Hongwei¹, HAN Meidong¹, SUN Dong¹

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Huanglong National Scenic Area Administration, Songpan, Sichuan 623300, China; 3. College of Materials and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract The study area is Huanglong Wucai pool in China. In recent years, due to the influence of *Salix cupularis* thicket in Zhuanhua pond of the upstream source water area, there has been strong surface water leakage, resulting in a decrease of water conservation and shrinkage of water landscape, which in turn has caused the degradation of pools such as blackening and podzolization. Through analyzing the characteristics of water conservation in Wucai pool and their influence on the evolution of travertine landscape, this study discusses the effect on landscape restoration by artificial intervention in the reduction of surface water leakage, so as to provide systematic results and technical reference for subsequent landscape conservation and serve the protection of the core value of Huanglong World

Natural Heritage Site.

By means of field investigation, flow monitoring, water quality monitoring, particle analysis, SEM characterization, and experiment on water quantity regulation and conservation, the characteristics and causes of water runoff leakage in the source water area of Wucai pool were identified, and the effects of artificial leakage reduction on the evolution of travertine landscape in the study area were analyzed. Five monitoring stations were set up to monitor the total flow in Zhuanhua pond, the water flow entering Wucai pool and the corresponding changes in hydrochemical characteristics. Meanwhile, pH, temperature and conductivity were measured by a handheld WTW 3310 pH meter, and Ca^{2+} and HCO_3^- were measured by titration on-site. The monitoring period was from April to November, 2019. Collected from loose travertine at the forest area of Zhuanhua pond and from the newly formed loose travertine at the bottom of landscape pool, the particle analysis samples and SEM samples were used to analyze the transformation and destruction of travertine body by the root system of *Salix cupularis* thicket. Thin-walled rectangular weir and triangular weir were used for flow measurement. After water flow regulation of Zhuanhua pond, isolation of channel with strong leakage, and conservation of Wucai pool, the impact of the increased water flow on the improvement of local degradation of Wucai pool was assessed on June 5, 2020.

The research findings show, (1) The quality of spring water from Zhuanhua pond in the source water area is stable, with high partial pressure of carbon dioxide and high calcium. Degassing reaction occurs along the river, and calcite is oversaturated at a low level to the southern edge of Wucai pool. (2) Due to activities of thicket root and influences of freeze-thawing, strong runoff leakage occurs in the source water area, and only 49% of the total water flow can enter Wucai pool to form a landscape conservation water source. The main site of strong leakage is located at the west branch channel composed of loose calcareous gravel and sand in Zhuanhua pond. (3) The leakage in the source water area caused a relative decline in the water conservation capacity of Wucai pool. The northern edge of Wucai pool became blackened and water in the east part was displaced by surface water of Huanglonghou Ditch to form podzolization. The scale of the landscape pools shrank to about half of its early size. The maximum natural landscape water conservation of Wucai pool, with the capacity of $5,115 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, generally occurs in September. (4) Through artificial conservation, the impact of surface water leakage in the source water area of Wucai pool landscape is reduced. During the main conservation period (July–October), the proportion of the water conservation into Wucai pool increased to 83%, up from 49% before artificial conservation, and the average monthly water flow increased from $4,892 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ to $8,674 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, with an increase of water conservation capacity of 77%. Before and after the conservation of Wucai pool, the concentration of calcium and bicarbonate ions in water changed little; SIc changed from oversaturation to equilibrium; carbon dioxide degassing in the middle and lower reaches increased; the deposition capacity of travertine generally increased. (5) During the main conservation period, the average monthly water flow after conservation increased by $3,559 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. $2,544 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ of water was consumed to restore the blackened pool in the north and alleviate podzolization in the east, accounting for 29% of the total capacity of water conservation in Wucai pool. The landscape water area of Wucai pool increased by 16.3% and remained at the same level after the four-month landscape restoration and conservation.

The degradation such as blackening and podzolization of Wucai pool caused by increasing surface water leakage in the source water area by activities of root system of *Salix cupularis* contributed to the decrease of water conservation capacity in the landscape area. However, through the artificial leakage reduction and conservation experiment, the water conservation capacity increased, and thus the degradation was contained and the travertine landscape was restored to a certain extent in the study area, which indicates that appropriate artificial intervention is beneficial to landscape protection.

Key words Zhuanhua pond, leakage, thicket, artificial conservation, Wucai pool

(编辑 张玲)