

# 世界遗产—四川黄龙钙华景观研究进展与展望

张金流<sup>1,2</sup>, 刘再华<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 本文在分析了有关四川黄龙钙华景观研究的主要文献的基础上, 综述了目前对黄龙钙华景观形成(钙、水、CO<sub>2</sub> 来源; 钙华沉积速率等)及退化方面(砂化、变黑等)的研究进展, 以及这些研究中存在的问题, 提出了下一步急需开展的研究工作(如旅游带入的磷酸盐污染对藻类的生长以及水藻本身对钙华的侵蚀和沉积作用等), 这些研究工作旨在为黄龙钙华景观的保护、修复和可持续利用提供科学依据。

**关键词:** 钙华; 研究进展; 展望; 景观保护; 黄龙

中图分类号: P641.134; P642.25 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2010)01-0079-06

黄龙风景区位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县境内, 以其美丽和独特的钙华景观(最壮观的露天钙华彩池群、最大的钙华滩流、最大的钙华瀑布)以及周围无与伦比的森林、雪山、峡谷等景观, 被誉为“圣地仙境, 人间瑶池”(引自 <http://www.huanglong.com/main.html>), 并于1992年被联合国教科文组织列为世界自然遗产, 每年吸引国内外超过一百万的游客前来游览, 而且游客数量还在逐年增加, 由此给国家和地方每年带来数十亿元人民币的收入。然而, 可能由于过度的资源利用, 也或是全球气候变化的影响, 黄龙钙华景观出现了加速退化的现象, 主要包括: (1) 地表水量减少使某些钙华彩池干枯或季节性干枯, 不但本身失去观赏价值, 还影响总体观感; (2) 地表溪流流量减少, 加上可能的人为污染, 藻类加速繁殖, 使得某些钙华颜色由黄变黑, 失去美感, 黄龙总体景观大打折扣, 有“黄龙”变“黑龙”之忧; (3) 总体钙华沉积似在变慢, 自我修复能力下降。同时, 发生局部溶蚀现象, 使钙华侵蚀砂化加剧, 某些钙华彩池被逐渐填平, 失去观赏价值。

上述钙华景观退化现象不仅引起了科研人员的极大关注<sup>[1-4]</sup>, 也引起了黄龙国家级风景名胜区管理局和联合国教科文组织世界遗产委员会的高度重

视。为防止钙华景观继续退化, 并对退化景观进行修复, 以使黄龙世界自然遗产得以永续利用, 急需对景观退化的人为和自然影响机理进行深入系统的分析研究, 以回答钙华退化究竟是人为影响为主还是天然影响为主, 以及其中的物理、化学和生物作用机理是什么等关键科学问题。

下面, 本文将在分析有关四川黄龙钙华景观的主要研究文献的基础上, 综述目前对黄龙钙华景观形成及演化方面的研究进展, 以及这些研究中存在的问题, 并展望下一步需及早开展的工作。

## 1 黄龙钙华景观形成研究

钙华景观的形成是碳酸钙-水-CO<sub>2</sub> 气三相相互作用的结果。明确三者的来源、作用机理等基本问题是认识黄龙钙华景观形成的前提。自上世纪80年代开始, 国内外就有许多单位和个人在黄龙对钙华景观形成的水、CO<sub>2</sub> 气、碳酸钙来源, 以及钙华沉积速率和沉积机理等方面开展研究, 但不同研究者之间得出的结论不尽相同, 有些还存在较大分歧, 特别是有关黄龙钙华形成的CO<sub>2</sub> 气体来源还有不同的意见<sup>[5-12]</sup>。

收稿日期: 2009-06-16; 改回日期: 2009-11-20

基金项目: 中科院“百人计划”项目、国家自然科学基金项目(40872168)资助

第一作者简介: 张金流, (1974—), 男, 博士研究生, 主要从事生物地球化学研究。E-mail: zhanggolden@163.com

\* 通讯作者: 刘再华, 研究员, E-mail: liuzaihua@vip.gyig.ac.cn

### 1.1 黄龙钙华源泉和景观水来源的研究

水是黄龙钙华景观的命脉,如没有富含  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  离子水的涵养,钙华景观就会失去其金黄或雪白的美体,从而很快砂化或变黑<sup>[3,13]</sup>,因此,对黄龙补给水及循环的研究,是保护黄龙钙华景观的前提。

陈先等<sup>[14]</sup>分析了泉水的 D、 $^{18}\text{O}$  同位素,发现其值位于大气降水线附近,从而得出黄龙沟内水具有大气降水补给的特征;卢国平<sup>[9]</sup>等从水化学、同位素研究出发,认为钙华泉水主要来自冰碛层内浅层地下水;郭建强等<sup>[13]</sup>运用水均衡原理和水化学系统分析并结合天然同位素示踪技术,初步查明黄龙地区水循环规律,即:黄龙景区望乡台南部含水单元(接受大气降水补给)为景区内地下水补给区,补给区的大气降水一部分在深部充分循环、水岩相互作用后,富含  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  等离子,在黄龙沟景区顶端以转花泉群形式出露,成为黄龙钙华源泉,控制钙华景观的发展、演化。姜泽凡等<sup>[15]</sup>通过对黄龙地区地质环境条件、水系统及不同水化学对比分析,认为形成黄龙钙华的水主要来自望乡台下出露的转花泉群,而此泉水是该地区碳酸盐岩溶深层地下水,并通过钙华源泉水的温度及化学成分估算出这种地下水的循环深度大约为 200~250 米。而李前银等<sup>[16]</sup>的研究,进一步细化了黄龙景区水系统,即黄龙景区水系统由后沟地表水系统、钙华源泉地下水系统和核心景区水循环转化系统三部分组成。其中,后沟地表水系统对景观形成与演化主要是水量的贡献,钙华源泉则提供了钙华沉积的物质来源,两者混合后构成景观补给水源并在核心景区经多次转化形成二次转化系统。二次转化系统又分为四个转化段及相应的四个钙华沉积和景观演化段。

总之,通过以上研究,目前对黄龙沟水的补给及其在黄龙沟的循环过程已基本达成共识,即构成黄龙沟景观水主要来源于大气降水、地表水及地下水的混合,而对景观形成起主要作用的是深层地下水,即碳酸盐岩岩溶水。

### 1.2 黄龙钙华景观源泉 $\text{CO}_2$ 气体来源的研究

黄龙钙华源泉水中  $\text{CO}_2$  气体的来源,目前主要存在两种不同观点,即冷成因论(或气候成因论)<sup>[6,11]</sup>和热成因论(或深成因论)<sup>[5,7-10,12]</sup>。卢国平<sup>[6]</sup>根据黄龙沟水温介于 3~10℃,认为黄龙钙华是冷水型的;周绪纶等<sup>[11]</sup>根据泉水气体成分、土壤中的  $\text{CO}_2$  分压、水温及泉口特征等,认为泉水中的

$\text{CO}_2$  来源于表层土壤,即冷成因型;而刘再华等<sup>[5,7-10,12]</sup>根据黄龙泉水的水化学、 $\text{CO}_2$  分压、碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  值、氮同位素比值等证据,认为形成黄龙钙华泉水中的  $\text{CO}_2$  来源于深部,即来源于地幔成因  $\text{CO}_2$  和地壳石灰岩热变质成因  $\text{CO}_2$ 。这两种气体来源说焦点主要集中于不同的  $\text{CO}_2$  来源途径,前者认为  $\text{CO}_2$  主要来源于地表土壤和大气,即主要是生物成因的和大气成因的  $\text{CO}_2$ ,而后者认为  $\text{CO}_2$  主要来源于地球深部,类似于云南白水台的情况,属于内生成因  $\text{CO}_2$ <sup>[17]</sup>。随着研究的进展,发现后一观点能更好地解释一些现象,如据刘再华等的研究<sup>[5,7-10,12]</sup>,黄龙泉水中的  $\text{CO}_2$  分压高达  $230000 \times 10^{-6} \text{v}$ ,不太可能是气候成因或冷成因的,因为据相关研究<sup>[7,18]</sup>,即使在温暖湿热的热带和亚热带地区,土壤生物成因的  $\text{CO}_2$  含量最高也不超过  $100000 \times 10^{-6} \text{v}$ ,而黄龙景区土壤  $\text{CO}_2$  最高只有  $7500 \times 10^{-6} \text{v}$ ,而大气  $\text{CO}_2$  分压不足  $300 \times 10^{-6} \text{v}$ ,可见,黄龙土壤和大气  $\text{CO}_2$  分压分别只占泉水  $\text{CO}_2$  分压的 3% 和 0.1%<sup>[12]</sup>;又如,据刘再华等<sup>[5]</sup>现场采样分析,黄龙转花泉水中  $\text{CO}_2$  气体的碳稳定同位素组成  $\delta^{13}\text{C}$  值是 -6.8‰,也不是土壤  $\text{CO}_2$  成因能解释的。据 Craig<sup>[19]</sup>的研究,土壤生物成因的  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值为 -25‰(变动范围 -16‰~-28‰),地幔成因的  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  是 -4‰~-11‰,而大气  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  是 -8‰。虽然,黄龙转花泉水中  $\text{CO}_2$  气体的  $\delta^{13}\text{C}$  值既与大气接近,又落在地幔成因  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  区间内,但考虑到泉水  $\text{CO}_2$  分压与大气  $\text{CO}_2$  分压的巨大差异,则黄龙  $\text{CO}_2$  来源于地球深部的可能性最大。

### 1.3 黄龙钙华景观中钙的来源研究

黄龙风景区位于岷山主峰雪宝顶北侧,地层近东西走向,形成南高北低之势,地层由老至新分别是泥盆系板岩夹灰岩、石炭—二叠系灰岩、三叠系凝灰质砂岩、板岩和干枚岩、第四系冰碛砂、碎块石和钙华。从分布上来看,黄龙沟望乡台以南主要是碳酸盐岩,以北主要是砂岩、板岩<sup>[4,5,13,15,16]</sup>。南部碳酸盐岩山区自然地成为地表水、地下水的补给区;以冰雪形式滞留地表、缓慢下渗的大气降水,一部分通过碳酸盐岩的裂隙、溶洞向深部运动,在溶解了大量因岩石变质作用产生的二氧化碳气体以及可能来自地幔的二氧化碳气体后,溶蚀碳酸盐岩的能力大大增加。地下水溶解了大量的碳酸钙后,经过复杂的运移,遇北侧砂板岩隔水层,在望乡台一带通过东西向的断裂裂隙上升进入冰碛层中,与冰碛层孔隙水混

合, 降温, 最后以转花泉群的形式出露, 形成黄龙钙华源泉<sup>[4, 5, 13, 15, 16]</sup> (图 1)。泉水出露地表后, 由于压力下降, 水中的  $\text{CO}_2$  气体迅速逸出, 使泉水相对于方解石过饱和, 而从溶液中析出, 即形成黄龙钙华景观。据姜泽凡等的研究<sup>[20]</sup>, 黄龙钙华主要矿物成份为方解石、文石及白云石, 其中方解石、文石约占 90% (文石占 0—30%), 白云石约占 5%。次要矿

物成份为石英(泥砂)、氧化铁、藻类化石等。其主要化学成份为  $\text{CaCO}_3$  (90% 左右), 次为  $\text{MgCO}_3$  (5%), 尚含少量的 Cu、Pb、Zn、Mn 等金属物质。平均比重为 2.69, 容重 1.94。

可见, 关于黄龙钙华景观钙的来源已有比较一致的看法, 即与补给区碳酸盐岩的溶解和地下水的搬运有关。

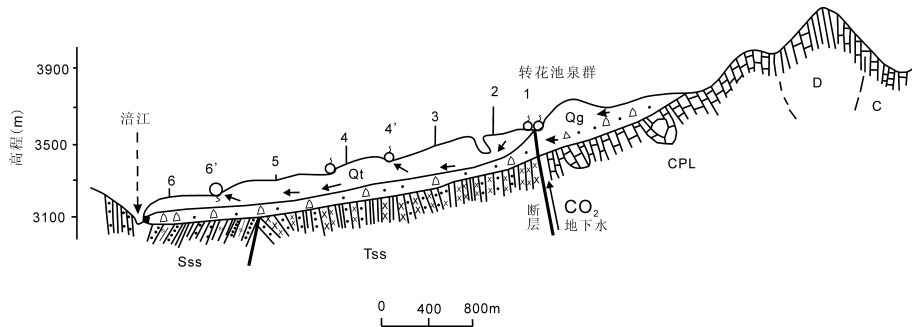


图 1 黄龙钙华形成的水文地质条件剖面图(据文献[5]修改)

Fig. 1 Cross section showing hydrogeological settings for the formation of Huanglong travertine(modified from ref. [5])

QV/Qg: 第四系钙华/冰碛砂及砾石; Tss: 三叠系凝灰质砂岩、板岩和千枚岩; CPL: 石炭—二叠系灰岩;

D: 泥盆系板岩夹灰岩; Sss: 志留系硅质板岩夹砂岩; 1~6: 研究监测点

QV/Qg-Quaternary travertine/glacial sand and gravel; Tss-Triassic sandstone and slate; CPL-Carboniferous and Permian limestone; C-Carboniferous limestone; D-Devonian slate and limestone; Sss-Silurian slate intercalated with sandstone; 1~6: Monitoring sites

#### 1.4 钙华沉积速率控制的水动力学模型研究

目前应用于预测黄龙钙华沉积速率的两类模型有 PWP 模型<sup>[21]</sup> 和 DBL 模型<sup>[22, 23]</sup>。PWP 模型属于表面反应控制模型, 它不考虑流速控制的扩散边界层内的物质传输和  $\text{CO}_2$  与  $\text{HCO}_3^-$  之间相互转换对钙华沉积速率的影响, 因此很难解释流速不同而水化学性质相似或相同时钙华沉积速率的差异, 如钙华边石坝上和钙华池内沉积速率的显著差异。而 DBL 模型考虑了可能是限制钙华沉积速率的以下三个因素: (1)通过固—液边界层附近厚度为  $\epsilon$  的扩散边界层内的反应物的分子扩散速率; (2) $\text{CO}_2$  向  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{H}^+$  的转变速率, 即在方解石沉积或溶解时,  $\text{CO}_2$  和  $\text{HCO}_3^-$  之间并非处于平衡; (3)固相  $\text{CaCO}_3$  表面发生的非均相(多相)化学反应速率。这三个因素在野外条件下, 会由于外界条件不同(静水或快速流动水体)而发生改变, 而这三个因素都能显著控制钙华的沉积速率。因此 DBL 模型能更好地预测不同流速条件下钙华的沉积速率, 与野外实际观测值<sup>[9, 20, 24, 25]</sup> 很接近, 是目前最为理想的预测流动条件下(如钙华滩、钙华瀑布和钙华边石坝处)钙华

沉积速率的模型。然而, 对于静止水体, 如钙华池中钙华沉积速率的预测, 有待于开发新的模型。

## 2 钙华景观退化研究现状

如前所述, 水是钙华之命脉, 因此至今关于钙华景观退化的问题主要集中于水量减少方面的研究<sup>[1-4, 13, 15, 16]</sup>。如胥良等<sup>[3]</sup>认为钙华变黑与砂化现象在黄龙景区较为普遍的存在, 多出现在钙华衰退区域, 是因位置较高, 或水流流向改变, 水流无法到达, 钙华因失去水流涵养而产生以氧化为主的风化作用的结果。杨俊义等<sup>[1]</sup>认为钙华漏斗是导致景观水量减少的原因, 并提出解决这一重要问题的办法是工程堵漏。郭建强等<sup>[13]</sup>认为黄龙钙华体目前总体是向衰亡的趋势发展。并认为这是高原整体抬升、河流强烈下切, 区域地下水位下降的必然结果。此外, 他们还认为黄龙钙华变黑的原因是钙华体表面富含藻类生物, 因失去地表水的涵养造成藻类生物死亡、炭化变黑, 以及钙体砂化等, 故水是黄龙钙华景观的生命。

值得关注的是, 进入本世纪以来, 鉴于黄龙钙华

景观的加速退化,国家和四川省政府加大了对黄龙景观保护的研究,如2004年成都理工大学万新南获批的国家自然科学基金项目“九寨、黄龙水循环与钙华景观的动态平衡研究”,通过现场调查、示踪试验、典型地段的特殊地球物理探测、室内仿真物理模拟及计算机数值模拟,探讨近百年来水体运动与钙华沉积的动态平衡关系,明了水、钙作用机理,确诊景观退化的原因;又如,2004年5月,四川省发展和改革委员会启动了“九寨—黄龙核心景区水资源及生态地质环境可持续发展综合应用研究”重大项目,得出的初步结论是:九寨—黄龙核心景区处在一定演化周期的相对稳定阶段,某些年份或季节出现水量减少和局部景观的衰变现象,主要是降水量周期性波动变化的结果。然而这一结论并未回答近些年来钙华景观加速退化(以地表水量减少、藻类加速繁殖钙华变黑和钙华侵蚀砂化加剧为表征)的真正原因及其内在的物理、化学和生物作用机理。该两项目主要是从水量循环与钙华景观的关系上做文章。无疑这是很重要的一个方面。然而,钙华的形成和演化(包括退化)首先是一个化学过程,而且这个化学过程不仅与水量循环有关,还与生物(特别是水生生物)作用和人类污染密切相连,因此,最终解决黄龙钙华景观退化的问题必须借助系统科学的思路,即从物理、化学和生物综合作用的角度进行深入系统的分析研究。有鉴于此,国家自然科学基金委于2008年批准了我们申报的新的基金项目“世界遗产—黄龙钙华景观退化的人为和自然影响机理研究”(批准编号:40872168)。该项目将在申请者20年钙华及其相关研究工作的基础上对黄龙钙华景观退化的人为和自然影响机理进行系统深入的研究,以回答钙华退化究竟是人为影响为主还是天然影响为主,以及其中的物理、化学和生物作用机理是什么等关键科学问题。以下是基于该项目的研究展望。

### 3 研究展望

#### 3.1 黄龙源泉CO<sub>2</sub>和水的来源及其时空动态机理

通过岩溶水化学和碳稳定同位素<sup>δ<sup>3</sup>C</sup>的研究<sup>[5,7-10,12]</sup>,我们得出了黄龙钙华起源的CO<sub>2</sub>主要来自地球深部变质作用和幔源碳的混合的初步结论,并质疑了前人提出的气候成因说<sup>[6,11]</sup>,但目前缺乏不同季节(特别是旱季和雨季、旅游旺季和淡季)自泉口至下游不同地点岩溶水化学和碳同位素的配套采样分析,而且,在现今日益增加的旅游活动影响

下的水化学和碳同位素与我们90年代初研究时相比是否发生了显著变化?旅游活动对钙华的形成有何影响?此外,关于幔源碳,还有待氮同位素的进一步取样分析确认。

此外,虽然前人对黄龙水的来源已进行过同位素研究<sup>[14]</sup>,但地下水在钙华中的运移规律,地表水(包括黄龙沟右侧地表融雪溪水)与地下水的相互转化规律目前仍不十分清楚,因而难以回答地表水减少究竟是区域气候变化所致<sup>[26]</sup>还是局部渗漏<sup>[1]</sup>加剧(可能与人为活动造成局部地表水和地下水的加速溶蚀、侵蚀有关)所致等重要问题。

#### 3.2 水生生物(特别是藻类)数量和种类的变化及其原因

野外观测发现,近些年来,黄龙沟内某些地段(特别是黄龙中寺旅游饭店下游)钙华表面和水池中的藻类,有加速繁殖的趋势,有人认为是否是全球变暖所致,但有人怀疑是日益增加的旅游活动(游客增加等带来的水体污染和富营养化加剧)的后果。水生藻类的繁殖一方面因其白天的光合作用消耗水中的CO<sub>2</sub>,可增加钙华的沉积<sup>[27,28]</sup>,但另一方面,其呼吸释放的CO<sub>2</sub>和可能的有机酸分泌则会对钙华产生侵蚀<sup>[27]</sup>,从而对钙华沉积不利。此外,某些黑色气生蓝藻的繁殖则影响钙华的观感。因此,水生生物,特别是藻类的数量和种类的变化(旅游淡/旺季的变化、黄龙中寺旅游饭店上/下游的变化)及其原因也是需要研究的重点。

#### 3.3 钙华沉积速率时空变化及其控制机理

我们的前期研究<sup>[5,9,10,24]</sup>发现,90年代初,黄龙钙华的沉积速率为每年0.43 mm至4.7 mm,且自五彩池往下游方向有逐渐降低的趋势,主要控制因素为方解石饱和指数SI<sub>c</sub>、水中的Ca<sup>2+</sup>浓度、流速等。然而,当时没有进行沉积速率季节变化的研究,因而缺乏沉积速率时间动态的认识。此外,当时的研究忽略了生物作用的影响<sup>[24]</sup>,但在目前藻类加速繁殖和人类旅游活动显著增加的情况下,沉积速率是否发生了显著变化?假如发生了变化,沉积速率是增大了还是降低了?其中的人为和自然影响物理、化学和生物作用机理又是什么?这些都是需要解决的重大科学问题。

总之,未来的研究需要解决以下三个关键科学问题:

(1) 地表水减少的真正原因是什么?是气候变化所致,还是向地下的渗漏增加所为?

(2) 藻类数量(种类)增加的原因是什么? 是自然因素, 还是人为污染造成了富营养化? 并从钙华矿物成分和所含生物结构及生物标志物, 对比白色和黑色钙华, 找出着色色素是无机成因还是生物色

素所为;

(3) 钙华侵蚀砂化的原因是什么? 是气候变化所致? 还是人为影响所为? 其中的物理、化学和生物作用机理又是什么?

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 郭建强. 四川九寨沟、黄龙钙华景观保护研究[ J ]. 四川地质学报, 2005, 25(1): 23—25.
- [ 3 ] 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. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(4): 79—84.
- [ 4 ] 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, (1): 107—116.
- [ 5 ] 刘再华, 袁道先, W. Dreybrodt, 等. 四川黄龙钙华的形成[ J ]. 中国岩溶, 1993, 12(3): 185—191.
- [ 6 ] 卢国平. 四川黄龙—九寨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.
- [ 7 ] 刘再华, 袁道先, 何师意. 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.
- [ 8 ] 刘再华, 袁道先, 何师意, 等. 地热 CO<sub>2</sub>—水—碳酸盐岩系统的地球化学特征及其 CO<sub>2</sub> 来源[ J ]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(2): 209—214.
- [ 9 ] 刘再华, 袁道先, 何师意, 等. 2003. 四川黄龙沟景区钙华的起源和形成机理研究[ J ]. 地球化学, 32(1): 1—10
- [ 10 ] Yoshimura K, Liu Zaihua, Cao Jianhua, *et al.* Deep source CO<sub>2</sub> in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sichuan, China[ J ]. Chemical Geology, 2004, 205(1—2): 141—153.
- [ 11 ] 周绪伦. 关于四川黄龙钙华 CO<sub>2</sub> 成因的讨论[ J ], 四川地质学报, 2006, 26(3): 143—146.
- [ 12 ] 刘再华. 再论黄龙钙华的成因—回应周绪伦先生“黄龙钙华是热成因还是冷成因”一文[ J ]. 中国岩溶, 2008, 27(4): 388—390.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 陈先, 朱学稳, 周绪伦. 黄龙风景区岩溶水及泉水沉积的同位素研究[ J ]. 中国岩溶, 1988, 7(3): 209—212.
- [ 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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Liu Zaihua, Zhang Meiliang, Li Qiang, *et al.* Hydrochemical and isotope characteristics of spring water and travertine in the Baishuitai area (SW China) and their meaning for paleoenvironmental reconstruction[ J ]. Environmental Geology, 2003, 44(6): 698—704.
- [ 18 ] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学特征及其环境意义[ J ]. 地质论评, 2000, 4(3): 324—327.
- [ 19 ] Craig H. The geochemistry of the stable carbon isotopes[ J ]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1953, 3: 53—92.
- [ 20 ] 姜泽凡. 黄龙钙华及其沉积速率研讨[ J ]. 四川地质学报, 1990, 10(4): 281—28.
- [ 21 ] Plummer L N, Wigley T M L, Parkhurst D L. The kinetics of calcite dissolution in CO<sub>2</sub>-water systems at 5—60°C and 0.0—1.0 atm CO<sub>2</sub>[ J ]. Am. J. Sci., 1978, 278: 178—216.
- [ 22 ] Dreybrodt W, Buhmann D. A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion[ J ]. Chem. Geol., 1991, 90: 107—122.
- [ 23 ] 刘再华, Dreybrodt W. DBL 理论模型及方解石溶解、沉积速率预报[ J ]. 中国岩溶, 1998, 17(1): 1—7.
- [ 24 ] Liu Zaihua, Svensson U, Dreybrodt W, *et al.* Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measurements and theoretical prediction of deposition rates[ J ]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(15): 3087—3097.
- [ 25 ] 胥良, 姜泽凡. 基于钙均衡估算黄龙钙华沉积速率的探讨[ J ]. 中国岩溶, 2007, 26(2): 132—136.
- [ 26 ] 周长艳, 李跃清, 彭俊. 九寨沟、黄龙风景区的降水特征及其变化[ J ]. 资源科学, 2006, 28(1): 113—119.
- [ 27 ] Liu Zaihua, Li Qiang, Sun Hailong, *et al.* Diurnal variations of hydrochemistry in a travertine-depositing stream at Baishuitai, Yunnan, SW China[ J ]. Aquatic Geochemistry, 2006, 12(2): 103—121.
- [ 28 ] Liu Zaihua, Xiangling Liu, Changjun Liao. Daytime deposition and nighttime dissolution of calcium carbonate controlled by submerged plants in a karst spring-fed pool: insights from high time-resolution monitoring of physico-chemistry of water[ J ]. Environmental Geology, 2008, 55: 1159—1168.

## Progress and Future Prospect in Research on the Travertine Landscape at Huanglong, Sichuan——A World's Heritage Site

ZHANG Jin-liu<sup>1,2</sup>, LIU Zai-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** This paper summarized the achievements in research on the formation (e. g. the source of calcium, water and carbon dioxide) and degradation (such as travertine weathering and darkening) of the travertine deposits in the Huanglong Ravine, made by scientists both at home and abroad. At the same time, the remaining unresolved problems in these research work were raised. Then, future research needs to resolve these problems (such as the influence of phosphate pollution brought by tourist activities on the growth of aerial and aquatic algae in the Ravine, and travertine deposition), aiming at providing the scientific basis for the landscape protection, restoration and sustainable use of the world's natural heritage site.

**Key words:** travertine; research progress; future research prospect; landscape protection; Huanglong, Sichuan