

世界自然遗产-四川黄龙钙华景观的形成与演化

刘再华^{1,2)}, 田友萍³⁾, 安德军⁴⁾, 王海静¹⁾, 唐 淑⁴⁾,
张金流¹⁾, 孙海龙¹⁾, 刘 彦¹⁾, 张清明⁴⁾

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, 贵州贵阳 550002;

2)中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004;

3)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

4)黄龙国家级风景名胜区管理局, 四川松潘 623300

摘 要: 本文对作者十余年来在四川黄龙(世界遗产地)的钙华研究成果和最新的一些监测发现进行了综述, 目的是为公众更好地了解黄龙、保护黄龙提供科学基础。主要结果和结论是: (1)黄龙钙华的形成是由于地球深部高分压的 CO₂ 在碳酸盐岩补给区产生富含碳酸氢钙的地下水, 当其以泉的形式出露地表时, 由于泉水的 CO₂ 分压远远高于空气, 泉水中的 CO₂ 大量逸出, 结果导致碳酸钙过饱和而发生沉积; (2)黄龙钙华的颜色以黄色为主色调, 主要是在雨季因雨水冲刷土壤向水中混入泥沙的缘故; 而在旱季, 钙华主要形成于清亮干净的泉水, 因此, 钙华的颜色呈现出纯净碳酸钙沉积的本色-白色。这也是黄龙洞钙华剖面年层中出现黄-白相间亚层的原因; (3)高精度的铀-钍同位素测年表明, 黄龙钙华主体是全新世以来形成的; (4)地表水向地下河的漏失是黄龙地表水日益减少, 导致钙华体表面干涸, 从而气生蓝藻大量滋生, 致使某些钙华变黑的主要原因, 因此, 有必要尽早采取防渗补水措施; (5)旅游活动已对黄龙钙华景观产生影响, 包括上游人为践踏使下游钙华池淤塞, 以及磷酸盐污染使硅藻等过度繁殖和钙华沉积速率可能降低等, 因此, 必须尽早采取相应防控措施。

关键词: 钙华; 成因; 颜色; 形成年代; 地表水渗漏; 人为污染

中图分类号: P931.5; K928.70 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-3021(2009)06-841-07

Formation and Evolution of the Travertine Landscape at Huanglong, Sichuan, One of the World Natural Heritages

LIU Zai-hua^{1,2)}, TIAN You-ping³⁾, AN De-jun⁴⁾, WANG Hai-jing¹⁾, TANG Shu⁴⁾,
ZHANG Jin-liu¹⁾, SUN Hai-long¹⁾, LIU Yan¹⁾, ZHANG Qing-ming⁴⁾

1) State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002;

2) Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;

3) School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

4) Huanglong National Scenic Spot Administration, Songpan, Sichuan 623300

Abstract: To make people know more about the Huanglong Ravine of Sichuan (one of the world natural heritage sites) and provide scientific basis for protecting it, this paper summarized the authors' research achievements on the travertine deposits reached during the past decades along with the latest monitoring findings in the Huanglong Ravine. The major results and conclusions are: (1) The formation of travertine was because firstly dissolution of carbonate rock in the recharge area produced groundwater rich in calcium and bicarbonate ions under higher par-

本文由中国科学院百人计划项目和国家自然科学基金项目(编号 40572107、40872168)联合资助。

收稿日期: 2009-05-12; 改回日期: 2009-12-01。

第一作者简介: 刘再华, 男, 1963 年生。研究员, 博士生导师。长期从事岩溶作用动力学与全球变化研究, 近年来重点探讨钙华形成与景观保护和古气候环境重建问题。通讯地址: 550002, 贵州省贵阳市观水路 46 号。电话: 0851-5892338, E-mail: liuzaihua@vip.gyg.ac.cn。

tial pressure of deep-seated CO₂, and then calcite deposited on the ground surface due to CO₂ degassing from the groundwater-fed spring with much higher pCO₂ than that in the atmosphere, which made water to be supersaturated with calcium carbonate; (2) The dominant color of Huanglong travertine was yellow, which was mainly related to the interfusion of soil impurities in the rainy season due to soil erosion after rainfall. However, travertine was formed mainly in the clean and clear spring water in the dry season, so, the color of travertine was white, i.e., the native color of pure calcium carbonate. This was also the reason why the travertine section in the Huanglong Cave shows the lamination structure of yellow alternating with white; (3) High resolution uranium-thorium dating indicated that the main body of Huanglong travertine has formed since Holocene; (4) the main reason for the decrease in surface flow rate was leakage to the underground river, which results in the dryness and propagation of aerial algae communities on the travertine surface, the latter was the reason for the black color of travertine. Therefore, it is necessary to take measures to prevent leakage and replenish surface water as early as possible; (5) The tourism activity has shown its influences on the Huanglong travertine landscape. These include the filling up of some travertine rimstone pools downstream due to human trampling on the travertine landscapes upstream, and the propagation of diatom and possible decrease in travertine deposition rate due to the pollution of the phosphate in the tourism midseason. Therefore, relevant preventing and controlling measures must be taken as soon as possible.

Key words: travertine; origin; color; forming times; surface water leakage; anthropogenic pollution

因独特的自然景观,尤其是多姿多彩的钙华景观,四川黄龙于1992年被联合国教科文组织列为世界自然遗产保护地。为了揭示黄龙钙华形成的物理、化学和生物作用机理,以及气候、水文、地质构造和旅游活动对钙华形成和演化的控制,自20世纪90年代初开始,我们在多个国家自然科学基金项目等的资助下,就钙华形成的气(CO₂)、水(地表水和泉水)和岩石(碳酸盐岩)三要素开展了系统深入的创新性研究,基本理清了钙华形成和演化的规律,研究成果已发表在国内外重要期刊上(刘再华等,1993; Liu et al., 1995; 刘再华等,1997, 2000, 2003; Yoshimura et al., 2004; 刘再华等, 2005; 王海静等, 2009)。本文将对这些成果及最新的一些监测发现进行综述,目的是为公众更好地了解黄龙、保护黄龙提供科学基础。

1 黄龙钙华的成因

钙华是指富含碳酸氢钙的泉水、河水或湖水,在适当的物理、化学或生物条件下,因CO₂损失导

致碳酸钙过饱和,结果在地表沉积的多孔状碳酸钙(Pentecost, 1995, 2005)。其化学反应可简化如下:



可见,钙华形成的前提首先是水中富含碳酸氢钙,然后是具备CO₂损失导致碳酸钙过饱和的物理(如温度升高、流速加快)、化学(如pH值升高)或生物(如水生植物的光合作用)条件。

经过我们十余年系统深入的研究发现(刘再华等, 1993; Liu et al., 1995; 刘再华等, 1997, 2000, 2003; Yoshimura et al., 2004; 刘再华等, 2005; 王海静等, 2009),黄龙钙华的形成(图1)是由于地球深部高分压的CO₂在碳酸盐岩补给区产生富含碳酸氢钙的地下水,当其以泉的形式出露地表时,由于泉水的CO₂分压远远高于空气,泉水中的CO₂大量逸出,结果导致碳酸钙过饱和而发生沉积。这一发现与90年代初关于黄龙钙华是气候成因(冷成因)的认识(朱学稳, 周绪纶, 1990; 卢国平, 1994)有实质的不同。后者无法解释形成黄龙钙华的泉水具有的高CO₂分压(>2×10⁴ Pa)及其高¹³C同位素含量特征(δ¹³C≈

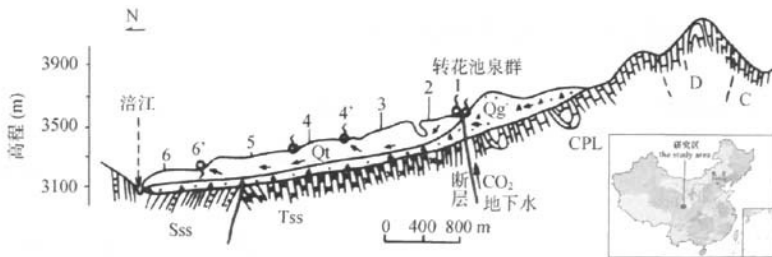


图1 黄龙钙华形成的水文地质条件剖面图[据刘再华等(1993)修改]

Fig. 1 Cross section showing hydrogeological conditions for the formation of Huanglong travertine (modified after Liu zai-hua et al., 1993)

Qt/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-石炭系和二叠系灰岩; C-石炭系灰岩; D-泥盆系板岩夹灰岩; Sss-志留系硅质板岩夹砂岩; 1-6, 4', 6'-研究监测点

Qt/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, 4', 6'-monitoring sites

-7‰)(刘再华等, 1993, 1997, 2000, 2003, 2005; Yoshimura et al., 2004)。

国外把气候成因的钙华称为 Tufa, 它起源于大气和土壤生物成因 CO_2 对碳酸盐岩的溶解作用, 而把起源于地球深部 CO_2 对碳酸盐岩的溶解作用的钙华称作 Travertine(Pentecost, 1995, 2005), 因此, 黄龙钙华的英文翻译应为 travertine, 而不是 tufa。泉水在向下游流动过程中, 由于水温和流速不断发生变化(刘再华等, 1993; Liu et al., 1995), 再加上藻类等植物和携有泥沙的沟内融雪水混合的作用, 导致碳酸钙沉积速率各异(刘再华等, 1993; Liu et al., 1995), 并使钙华呈现黄、白、蓝、绿、黑等各种颜色, 但以黄色为钙华的主色调, 这也是黄龙“黄”字的由来。

2 黄龙钙华景观的形成、年代与发展趋势

2.1 黄龙钙华景观的形成

黄龙钙华景观以钙华边石坝彩池、钙华瀑布、

钙华滩和钙华溶洞等独特的喀斯特沉积和溶蚀地貌为代表。

(1) 钙华边石坝彩池景观

钙华边石坝彩池是黄龙钙华沉积的主要形式之一。地表水在缓坡流动时受到原始地形坡度增加的影响, 或枯枝落叶的阻挡, 流速发生突变, 水中的 CO_2 在顺流向流速较快处逸出较快, 因而碳酸钙沉积较快, 而在背流向流速较慢处, CO_2 逸出和碳酸钙沉积较慢, 从而出现差异性沉积现象, 结果形成钙华边石坝彩池景观(刘再华等, 1993, 2003; Liu et al., 1995)。

因碳酸钙饱和度和水深差异等导致水对光的吸收和反射差异, 再加上池中生长的藻类颜色的不同, 出现了池水五彩斑斓的现象(照片 1-3)。黄龙的钙华池层层叠叠, 逶迤而下, 状似梯田, 它是迄今为止世界上发现数量最多、规模最大的边石坝彩池群景观。最具代表性的是五彩池(照片 1)、争艳池(照片 2)和迎宾池(照片 3)。



照片 1 五彩池钙华边石坝景观
Photo 1 Travertine rimstone pools at Wucaichi



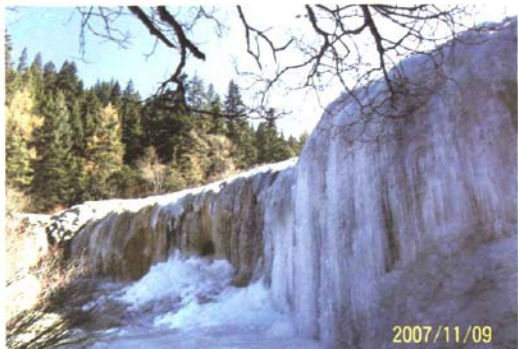
照片 3 迎宾池钙华边石坝景观
Photo 3 Travertine rimstone pools at Yingbinchi



照片 2 争艳池钙华边石坝景观
Photo 2 Travertine rimstone pools at Zhengyanchi



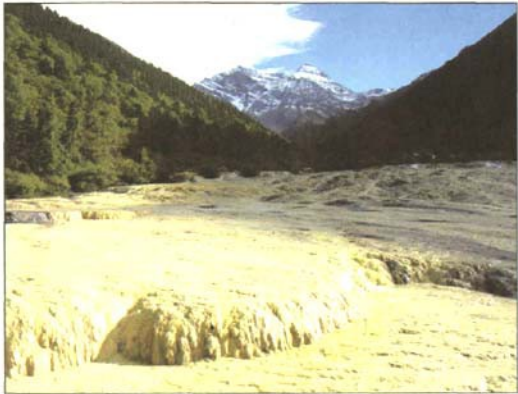
照片 4 飞瀑流辉钙华瀑布景观
Photo 4 Travertine cascade at Feipuliuhui



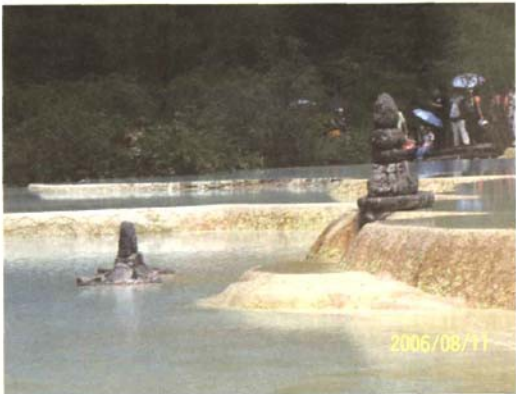
照片 5 洗身洞钙华瀑布景观
Photo 5 Travertine cascade at Xishengdong



照片 7 黄龙洞钙华溶洞景观
Photo 7 Travertine cave at Huanglongdong



照片 6 金沙铺地钙华滩景观
(照片中钙华表面的黑色斑块为气生蓝藻所致)
Photo 6 Travertine slope at Jinshapudi
(black patches in the photo caused by gas-generated blue green algae)



照片 8 雨季的五彩池钙华颜色：黄色
Photo 8 The color of travertine at Wucaichi in rainy season: Yellow

(2) 钙华瀑布景观

当水流经坡度较大的地段或地表塌陷处时，流速迅速增加，CO₂的逸出也显著增加，从而形成大型的钙华瀑布。黄龙代表性钙华瀑布景观有：飞瀑流辉(照片 4)和洗身洞(照片 5)。

(3) 钙华滩景观

由于失去了凝埂成池的地理条件，因此漫坡的水浪在缓缓的斜坡上翻飞，此时水中的 CO₂ 逸出也较快(刘再华等, 1993; Liu et al., 1995)，并在水底沉积出金黄色波纹状的钙华滩，如片片鳞甲，在阳光照耀下发出闪闪金光。黄龙钙华滩景观以金沙铺地(照片 6)最为典型。据考证，金沙铺地是目前世界上发现的同类面积最大、距离最长、色彩最丰富的地表钙华滩景观。

(4) 钙华溶洞景观

黄龙洞是主景区内最大的一个钙华溶洞，是由具有侵蚀性的地下水对钙华的溶蚀形成的。黄龙洞

也是五彩池地表水向地下渗漏的一个重要场所，洞内滴水 and 地下河流水不断，石钟乳、石笋、石幔和石瀑众多，千姿百态(照片 7)。

(5) 黄龙钙华的颜色之谜

黄龙钙华的主色调是黄色，但与气候有关，白色也是黄龙钙华很重要的颜色。据我们一年四季在黄龙的观测发现，黄龙钙华的黄色主要出现在湿热的雨季(照片 8)，这与雨水冲刷土壤向水中混入泥沙有关；而在干冷的旱季，由于钙华主要形成于清亮干净的泉水，因此，钙华的颜色呈现出纯净碳酸钙沉积的本色-白色(照片 9)。这也是黄龙洞钙华剖面年层中出现黄-白相间亚层的原因(照片 10)，即年层中的黄色亚层形成于雨季，而白色亚层形成于旱季。微层元素含量分析发现，黄色亚层中的 U、P、Mg 含量是白色亚层的 2-5 倍，而 Fe、Al 含量更高，达 10 倍以上，进一步说明钙华的黄色形成可能与雨季土壤物质的带入有关。



照片 9 旱季(2009 年 5 月 7 日)的五彩池钙华颜色: 白色
Photo 9 The color of travertine at Wucaichi in dry season: White

(照片中的黄色钙华是 2008 年雨季水位较高时形成的, 旱季时因水位较低, 钙华边石坝上无水漫过, 故没有沉积钙华, 原黄色钙华得以保留)

(Yellow travertine was formed in the rainy season of 2008 when the water table was fairly high; as the water table was rather low and no water overflowed the stone bar beside the travertine in the dry season, such yellow travertine could be preserved.)



照片 10 黄龙洞中所见的钙华年层
(白色亚层+黄色亚层=年层)
Photo 10 The annual lamination structure of travertine in the Huanglongdong Cave
(an annual layer=a white sub-layer +a yellow sub-layer)

根据云南白水台类似钙华的研究(Liu et al., 2006), 发现钙华亚年层厚度和碳氧稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)与降雨量呈负相关关系, 因此, 根据黄龙钙华亚年层的厚度和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$, 结合铀钍定年, 可恢复地质历史上降雨量的变化规律, 并在此基础上预测未来降雨量的可能变化, 因此, 黄龙钙华除了具有重要的旅游景观价值外, 其在过去气候重建研究中的价值也是不可估量的!

值得特别关注的是, 随着黄龙地表水的日益漏失减少, 大量钙华表面露出水面, 使得气生蓝藻



照片 11 五彩池景区下游干枯变黑的钙华池
Photo 11 Dried and blacked travertine rimstone pools at Wucaichi

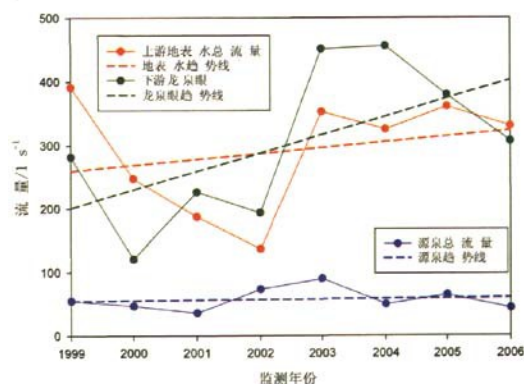


图 2 黄龙源总流量、上游地表水总流量和下游龙泉水流量多年变化趋势

Fig. 2 Multi-year trend for the flow rates of source springs, upstream surface river and the downstream Longyan Spring in the Huanglong Ravine

在其表面大量繁殖蔓延, 致使钙华颜色变为令人不快的黑色(照片 6)。长此以往, 黄龙钙华的景观价值将大打折扣! 因此, 有必要尽早采取防渗补水措施。

2.2 黄龙钙华的年代与发展趋势

黄龙钙华的形成有其自身的发展演化规律, 不仅与地质构造活动有关, 还取决于气候、水文和生物条件, 以及人类活动的影响。

经美国明尼苏达大学高精度的铀-钍同位素测定, 黄龙洞底部钙华年龄为距今 6110 年, 发育旺盛期至 9870 年前的张家沟钙华形成开始, 可见黄龙钙华主体是全新世以来形成的。

通过调查与 80-90 年代资料对比, 发现区内中下游地表流量有减少的趋势, 个别钙华池甚至枯竭(照片 11), 原因主要是沿途地表水在流动过程中不断地渗漏至地下, 相当一部分转变成了下游地下水

(图 2)。地表水量的减少, 还使钙华因失去水的滋养而风化, 或因气生藻类繁殖而变黑(照片 6、照片 11), 降低了景观价值。因此, 要防止黄龙钙华景观的退化, 解决地表水向地下的渗漏问题是下一步急需攻克的难题。至于水化学条件的变化对钙华的发展与演化的控制作用将在下一节“旅游活动对黄龙钙华景观产生的影响”中专门进行讨论。

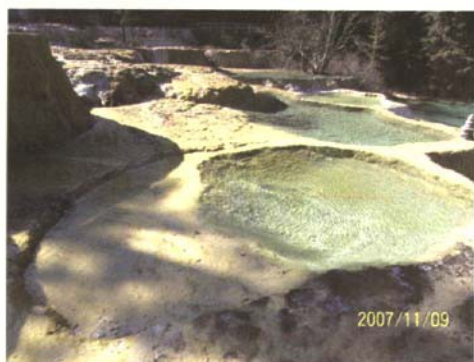
3 旅游活动对黄龙钙华景观产生的影响

自 20 世纪 90 年代初黄龙被列为世界自然遗产以来, 旅游人数成 10 倍增加, 已对黄龙沟钙华景观产生一定的影响。

首先, 由于部分游客对钙华的脆弱性不甚了解,

或者缺乏环保意识, 黄龙沟的钙华景观遭到了一定程度的破坏。如上游钙华滩被游人踩踏后, 景区出现了钙华彩池沙化填埋现象, 即彩池面积缩小, 水体变浅, 景观的美感下降(照片 12)。

此外, 旅游活动产生的对水体磷的污染(旅游旺季是淡季的 10 倍以上, 图 3)造成了硅藻在钙华滩景观上的大量繁殖(照片 13)。磷污染值得关注的另一问题是磷酸盐的存在, 当其浓度高于 0.1 mg/l 时(旺季已超过这一临界值, 图 3), 将大大地降低钙华的沉积速率, 这在学术界被称作磷酸盐对碳酸钙沉积的阻滞效应(Lin & Singer, 2006)。无疑这对黄龙景观的可持续利用是有害无益的! 建议有关管理部门尽早采取措施解决钙华践踏和旅游污染问题。



照片 12 黄龙沟上游钙华被踩踏(左)、下游彩池被淤积(右)现象

Photo 12 Imprints of trampling on the upstream travertine by tourists (left) and downstream filling up of the travertine rimstone pool in the Huanglong Ravine

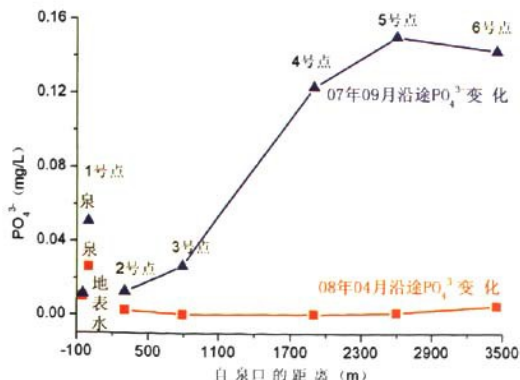


图 3 黄龙旅游旺季(9 月)和淡季(4 月)水中磷酸盐含量空间变化的比较

Fig. 3 Comparison of the spatial phosphate concentration change along the Huanglong Ravine between the midseason and the off-season

注: 旺季水的 PO_4^{3-} 含量明显增加, 且下游监测点较源头泉水和地表水增加数倍至 10 倍以上, 显示出旅游活动对水体磷酸盐的污染值得警惕!



照片 13 金沙铺地钙华滩表面大量繁殖的硅藻席 (主要为桥弯藻)

Photo 13 Prolific diatom mats (mainly *Cymbella* sp.) on the travertine slope at Jinshapudi

(很可能与磷污染造成的富营养化有关, 仍在监测研究中)

4 黄龙钙华景观的保育倡议

黄龙钙华景观的美,美在它的自然纯净,美在它的稀有珍贵,美在它的景观多样性。然而,如何让如此宝贵的世界自然遗产长久地保持她的魅力?自然的演变或许我们无法改变,但是我们完全可以有效地减少人类造成的破坏,最大程度上延长她的寿命,让我们更多的后代子孙能够有幸欣赏到这一大自然馈赠给人类的瑰宝!

黄龙呼唤您的呵护!更需要大家的培育!

参考文献:

- 刘再华, Yoshimura K, Inokura Y, Noto M, 曹云. 2005. 四川黄龙沟天然水中的深源 CO_2 与大规模的钙华沉积[J]. 地球与环境, 33(2): 1-10.
- 刘再华, 袁道先, Dreybrodt W, Svensson U. 1993. 四川黄龙钙华的形成[J]. 中国岩溶, 12(3): 185-191.
- 刘再华, 袁道先, 何师意, 曹建华, 游省易, Dreybrodt W, Svensson U, Yoshimura K, Drysdale R. 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.
- 刘再华, 袁道先, 何师意, 张美良, 张加桂. 2000. 地热 CO_2 -水-碳酸盐岩系统的地球化学特征及其 CO_2 来源[J]. 中国科学(D 辑), 30(2): 209-214.
- 刘再华, 袁道先, 何师意. 1997. 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, 71(3): 281-288.
- 卢国平. 1994. 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, 14(3): 71-78.
- 王海静, 刘再华, 曾成, 刘香玲, 孙海龙, 安德军, 唐淑, 张清明. 2009. 四川黄龙沟源头泉水及其下游溪水的水化学变化研究[J]. 地球化学, 38(3): 307-314.
- 朱学稳, 周绪纶. 1990. 岷山岩溶区的灰华沉积. 中国岩溶, 9(3): 250-264.
- Environmental Geology, 51: 257-265.
- LIU Zai-hua, Svensson U, Dreybrodt W, Yuan Dao-xian & Buhmann D. 1995. Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measurements and theoretical prediction of deposition rates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3087-3097.
- LIU Zai-hua, YOSHIMURA K, INOKURA Y, NOTO M, CAO Yun. 2005. Deep source CO_2 in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong ravines, Sichuan, China[J]. *Earth and Environment*, 33(2): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- LIU Zai-hua, YUAN Dao-xian, DREYBRODT W, SVENSSON U. 1993. The formation of tufa in Huanglong, Sichuan[J]. *Carsologica Sinica*, 12(3): 185-191 (in Chinese with English abstract).
- LIU Zai-hua, YUAN Dao-xian, HE Shi-yi, CAO Jian-hua, YOU Sheng-yi, DREYBRODT W, SVENSSON U, YOSHIMURA K, DRYSDALE R. 2003. Origin and forming mechanisms of travertine at Huanglong Ravine of Sichuan[J]. *Geochimica*, 32(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- LIU Zai-hua, YUAN Dao-xian, HE Shi-yi, ZHANG Mei-liang, ZHANG Jia-gui. 2000. Geochemical features of the geothermal CO_2 -watercarbonate rock system and analysis on its CO_2 sources: Examples from Huanglong Ravine and Kangding, Sichuan, and Xiage, Zhongdian, Yunnan[J]. *Science in China (D)*, 30(2): 209-214 (in Chinese with English abstract).
- LIU Zai-hua, YUAN Dao-xian, HE Shi-yi. 1997. The features of the stable carbon isotopes and geochemistry in the system of Carbonate- H_2O - CO_2 and their implications-Evidence from several typical karst areas of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 71(3): 281-288 (in Chinese with English abstract).
- Pentecost A. 1995. The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia minor[J]. *Quaternary Science Reviews*, 14: 1005-1028.
- Pentecost A. 2005. *Travertine*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- WANG Hai-jing, LIU Zai-hua, ZENG Cheng, LIU Xiang-ling, SUN Hai-long, AN De-jun, TANG Shu, ZHANG Qing-ming. 2009. Hydrochemical variations of Huanglong Spring and the stream in Huanglong Ravine, Sichuan Province[J]. *Geochimica*, 38(3): 307-314 (in Chinese with English abstract).
- Yoshimura K, Liu Zai-hua, Cao Jian-hua, Yuan Dao-xian, Inokura Y, Noto M. 2004. Deep source CO_2 in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sichuan, China[J]. *Chemical Geology*, 205: 141-153.
- ZHU Xue-wen, ZHOU Xu-lun. 1990. Deposition of travertines in karst area of Minshan Mt.[J]. *Carsologica Sinica*, 9(3): 250-264 (in Chinese with English abstract).

References:

- LIU Y, SINGER P C. 2006. Inhibition of calcite precipitation by orthophosphate: Speciation and thermodynamic considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 2530-2539.
- LIU Zai-hua, LI Hong-chun, YOU Cheng-feng, WAN Nai-jung, SUN Hai-long. 2006. Thickness and stable isotopic characteristics of modern seasonal climate-controlled sub-annual travertine laminas in a travertine-depositing stream at Baishuitai, SW China: implications for paleoclimate reconstruction[J].