

# 四川黄龙大湾—张家沟钙华沉积剖面的古气候记录研究

王华<sup>1)</sup> 杨更<sup>2,3)</sup> 章嘉铭<sup>1)</sup> 郭建强<sup>2)</sup> 曹俊<sup>2)</sup>

1) 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2) 四川省地矿局区域地质调查队, 四川双流 610213; 3) 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

**摘要** 本文通过对黄龙景区大湾张家沟钙华剖面的系统研究, 确认大湾张家沟 14.0~85.0 ka B. P. 钙华剖面的沉积层序, 该剖面不是自下而上由老到新的正常层序, 而可能是多期次(最少两期)沉积形成的。通过钙华氧碳同位素分析重建了钙华沉积过程中环境的变化: 在钙华剖面形成的早期, 夏季风强盛, 气温较高, 夏半年降水较多; 在钙华形成的中晚期, 气候干冷且变化较大。最后, 依据钙华的沉积特征和年代学数据, 初步探讨了该区钙华的沉积模式。

**关键词** 钙华, 年代学, 碳氧同位素, 古气候, 黄龙

## Records of Paleoclimate Changes Based on the Dawan-Zhangjiagou Travertine Deposition Profile in Huanglong, Sichuan

WANG Hua<sup>1)</sup> YANG Geng<sup>2,3)</sup> QIN Jiaming<sup>1)</sup> GUO Jianqiang<sup>2)</sup> CAO Jun<sup>2)</sup>

1) Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004; 2) Regional Geological Surveying Team, Bgeemsp, Shungliu, Sichuan 610213; 3) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059

**Abstract** The 14.0~85.0 ka B. P. deposition sequence along the Dawan-Zhangjiagou travertine profile in Huanglong was confirmed by a systematic investigation there. Not assuming the natural order that changes from bottom to top and from old to new, the travertine profile results probably from multi-stage deposition (at least two stages). Based on an oxygen-carbon stable isotope analysis, the authors reconstructed the palaeoclimate changes in the process of deposition. At the early stage of the travertine profile formation, the summer monsoon was powerful, the temperature was relatively high, and the precipitation was abundant in the summer season; at the middle stage and the last stage, the climate was dry, cold, and liable to change. According to deposition characteristics and chronological data of the travertine, a model for travertine deposition in this area was tentatively constructed.

**Key words** travertine, chronology, oxygen-carbon isotope, paleo-climate, Huanglong

黄龙景区位于四川省阿坝州松潘县境内, 为世界级风景名胜, 是拥有世界自然遗产、世界人与生物圈保护区、绿色环球 21 三项国际桂冠的旅游胜地, 是人类的宝贵财富。为了对黄龙钙华景观进行科学保护, 实施可持续开发, 探究钙华景观的形成条

件和生成机理以及钙华退化的原因非常必要, 其不仅具有重要的科学价值, 对于履行保护世界遗产公约、建立大九寨国际旅游区可持续发展都具有重要意义。

80年代中期以来, 不少国内外的专家、学者进

本文由四川省地矿局区调队生态所科研项目资助。

责任编辑: 刘志强; 收稿日期: 2006-12-14; 改回日期: 2007-03-30。

第一作者简介: 王华, 女, 1957年生, 高级工程师, 主要从事同位素分析测试和同位素地球化学研究; 通讯地址: 541004, 广西桂林七星路 50号; 电话: 0773-5827074; E-mail: wanghua1@163.com。

入黄龙景区开展了地质、地貌、水文、生物、旅游等方面的调查研究,发表了大量的文献和论著(陈先等,1988;Lu et al., 2000;刘再华等,2000;李宏业等,2003;刘再华等,2005;周绪伦,2006),对黄龙沟主景区生态地质环境和水环境系统有了较为系统的认识,初步查明了形成黄龙钙华的水循环系统特征,但前人的研究多限于定性的研究,对于黄龙沟谷第四纪冰川发育特征及演化趋势,以及末次冰期后钙华的沉积环境、沉积模式和演化特征缺乏深入而又系统的研究。本文通过对黄龙大湾张家沟钙华剖面碳氧同位素和年代学的系统研究,初步探究了钙华景观形成发育的规律,重建了景观区的地质环境演化模式。

### 1 黄龙景区的自然环境及地质构造特征

黄龙景区地处青藏高原东缘岷山山脉主峰雪宝顶北麓,是青藏高原向四川盆地急剧下降的两大地貌单元过渡地带,属高山峡谷区,地势总体为南西高,北东低,相对高差在2000 m以上,平均高度在4000 m左右。气候为高原温带季风气候类型,以寒冷和半干燥为其基本特征。研究区的核心部分——黄龙沟海拔在3100~3569 m之间,属典型的温带—亚寒带季风气候,平均降雨量758.9 mm,5~9月的降雨量占全年的70%~73%,土壤主要为钙华、山地暗棕壤、棕壤(冉江洪等,2004)。

从地质构造上看(图1),景区位于西秦岭造山带摩天岭地块与松潘甘孜造山带的接触部位,以雪山断裂为界,北为摩天岭地块,以南为松潘甘孜造山带丹巴—汶川构造岩片。区内的主要构造线方向呈东西向展布,由北向南有雪山断裂带、望乡台断裂带等断层。以东西向展布的望乡台断裂为界,南部分布泥盆系、石炭系、二叠系的灰岩、白云质灰岩、生物碎屑灰岩等可溶性岩组;北部分布三叠系砂岩、板岩夹灰岩及志留系(雪山断裂以北)板岩夹砂岩夹灰岩等非可溶性岩组。南部可溶的碳酸盐岩发育的断裂、节理裂隙为岩溶水的补给、深部循环创造了条件;北部的非可溶性岩形成了黄龙沟中浅层地下水良好的隔水层(四川地矿局成都水文队,1986,1987)。

### 2 黄龙景区大湾张家沟钙华剖面

黄龙大湾张家沟在地貌上为古冰川谷,在沟尾

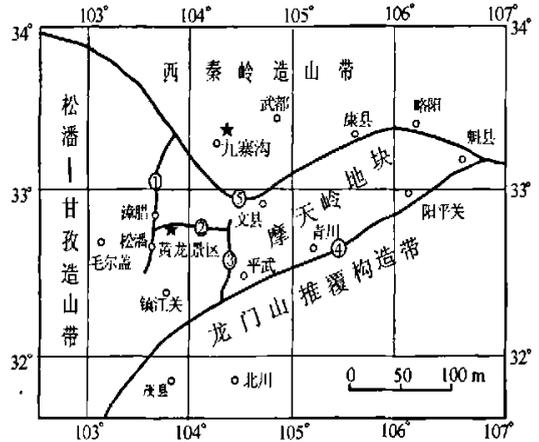


图1 黄龙景区大地构造背景图  
Fig. 1 Geotectonic setting of the Huanglong scenery zone

- ①-岷江断裂带; ②-雪山断裂带; ③-虎牙断裂带;
- ④-青川断裂带; ⑤-塔藏构造带
- ①-Minjiang fracture zone; ②-Xueshan fracture zone;
- ③-Huya fracture zone; ④-Qingchuan fracture zone;
- ⑤-Tazuang structure zone

发育有冰蚀湖,中下游为典型的冰川U型谷,由于受后期流水和重力堆积物的改造,目前的沟谷局部呈现出V型特征。据推测,冰川作用发生于中更新世晚期。

黄龙景区大湾张家沟钙华位于沟谷中游,出露海拔高度3400~3560 m,沿沟谷呈南北向分布,长约500 m,宽约200 m。后期流水作用将其切穿,出露完整的钙华纵剖面,与底界基岩接触关系清楚,钙华呈灰白色,长期风化后表面呈褐色、黑色斑块,下部胶结良好,质地坚硬,表层由于风化作用,疏松多孔,呈粉末状。

大湾张家沟剖面(图2)钙华厚约26.3 m,与下伏三叠系山组砂岩呈不整合接触。钙华从下到上为:浅黄色、浅灰白色水平层理钙华,厚11.26 m;黄色、黄白色波状弯曲层纹状钙华,含植物化石,钙华风化表面呈粉末状,厚8.83 m;黄灰色波状弯曲层纹状钙华夹砾石层透镜体,含植物化石,厚约6.21 m。

### 3 环境同位素研样品采集和分析

● 四川地矿局成都水文队, 1986, 1987. 黄龙、九寨沟旅游地质景观及矿泉水资源调查报告.

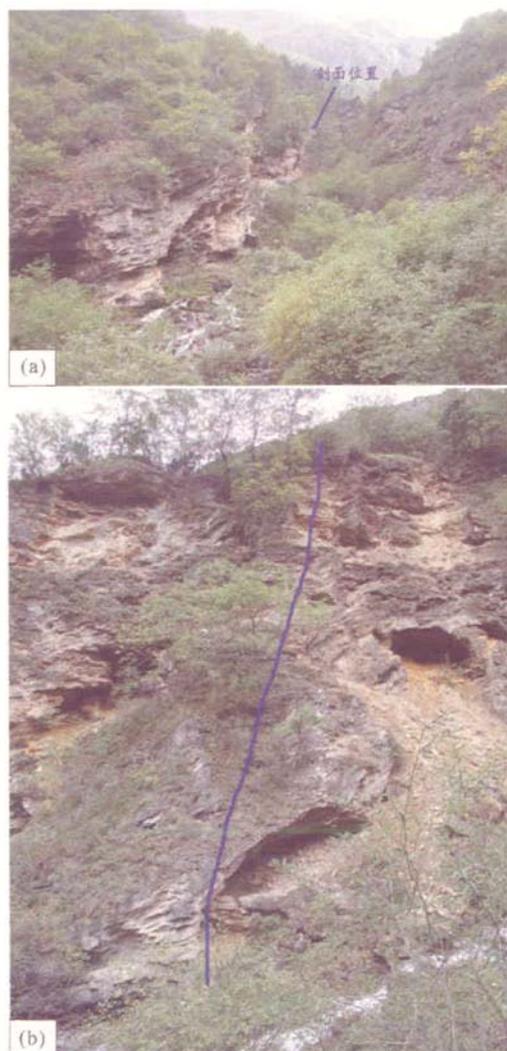


图2 大湾张家沟钙华取样点示意图  
Fig. 2 Sketch map showing travertine sampling sites  
in Zhangjiagou, Dawan

根据研究的需要对大湾张家沟钙华剖面进行系统取样 $^{14}\text{C}$ 测年样品9件、U系测年样品6件、ICP-MS测年样品3件、C、O同位素样83件。钙华样品年龄采用常规 $^{14}\text{C}$ 法、U系法和ICP-MS-U系法等多种测定方法,通过交叉对比以获得可靠的年龄数据。 $^{14}\text{C}$ 测年国家标准物质为糖碳,采用日本Aloka公司生产的LB1低本底液体闪烁仪测定;U系测年国家标准物质为GBW-04412、GBW-04413,采用美国Ortec公司生产的920-8 $\alpha$ 能谱仪测定; $^{14}\text{C}$ 测年和U系



图3 张家沟钙华年层的韵律结构(剖面下部)  
Fig. 3 Rhythm structure of the travertine layer in Zhangjiagou,  
Dawan (Lower part of the travertine profile)

测年由中国科学院岩溶地质研究所同位素实验室完成,而ICP-MS-U系法测年标准采用美国标准局NBL-112A标准,稀释剂采用 $^{229}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$ - $^{236}\text{U}$ 。仪器采用Finnigan Element型电感耦合等离子体质谱仪(德国MAT公司),由美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素实验室协助完成。碳、氧同位素采用英国VG公司MM903同位素气体质谱仪测定,碳氧同位素值以PDB标准,系统误差 $<0.1\text{‰}$ 。由中国地质科学院岩溶地质研究所同位素实验室完成。

#### 4 大湾张家沟钙华剖面层系问题

大湾张家沟剖面钙华生长层明显,呈明暗交替的互层分布。通常是暗色层较薄,而浅色层较厚,前者一般数毫米,泥质含量较多,后者较厚,最后达十几毫米,颜色较浅,多为较纯净的 $\text{CaCO}_3$ 组成(图3)。

钙华剖面中暗色层是雨季沉积形成的,泥质含量多且色暗;干季沉积形成的钙华,没有地表水及浅层水的混入,没有泥沙混入,因而常呈白色质纯而厚度较大。从野外实测叠置关系和产状来看,张家沟钙华剖面自下而上由老到新的层序似乎是没有问题的, $^{14}\text{C}$ 表观年龄数据也基本上相吻合。但是,整个剖面不同层位之间死碳加入的比例并不是固定不变的。因此单用 $^{14}\text{C}$ 表观年龄数据来判断,可能引出错误的结论(王华等,2004,2006)。

U系测年特别是ICPMS-U系测年,由于采用原

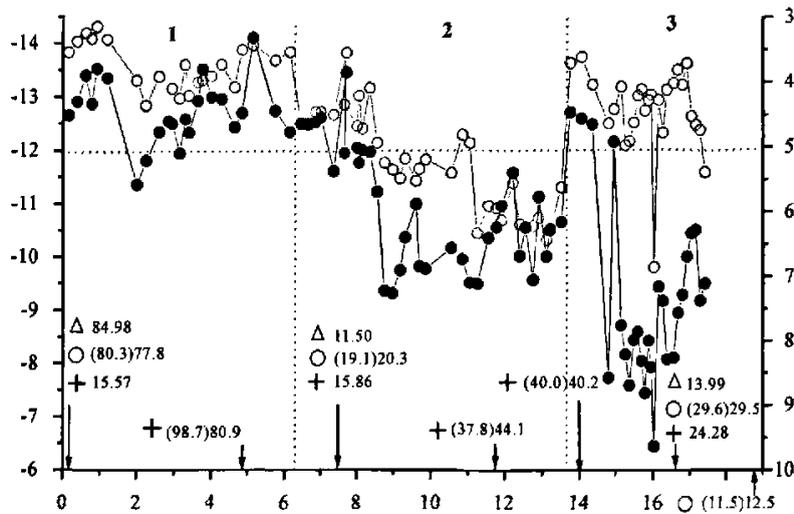


图4 大湾张家沟剖面钙华碳氧同位素记录

Fig. 4 Oxygen-carbon isotope records of travertine along the Dawan-Zhangjiagou section

△-ICPMSU 系年龄(ka); O-α 计数 U 系年龄括弧内为校正年龄(ka)

△-age of ICP-MS-U series (ka); O-age of α counter-U series, corrected age (ka) in bracket; + -age of β counter-<sup>14</sup>C (ka)

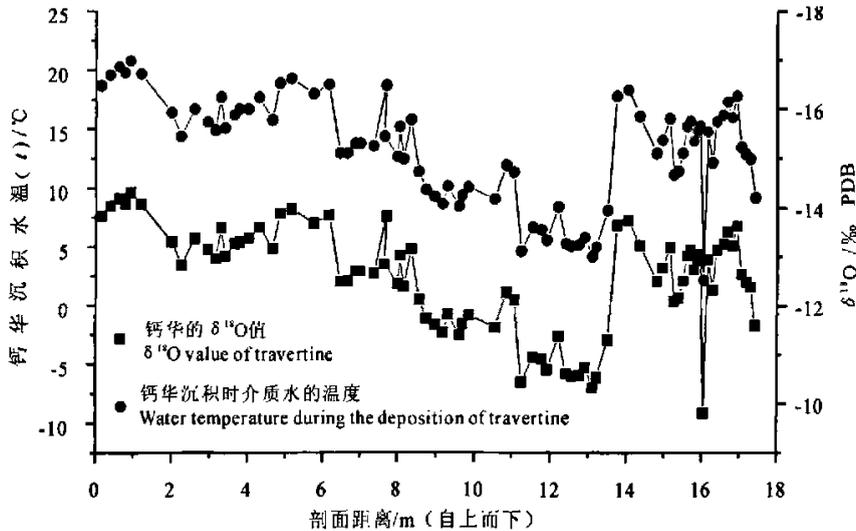


图5 张家沟钙华沉积时的水温变化

Fig. 5 Temperature variation during the deposition of travertine

子计数,具有特别高的灵敏度和测试精度,根据测年分析结果。大湾张家沟剖面的层系相互关系,可能不是自下而上的简单的叠置关系。我们认为上部6 m左右的一段并不是钙华剖面的上部层位,它的实际年龄应为80 ka左右,是本区目前为止发现的最老的钙华沉积,属晚更新世的中期。在此以下其余部分,其年龄为10~40 ka(陈先等,1988),属晚

更新世的晚期。前者产状近直立,后者产状比较平缓,显然沉积类型是不一样的。两者间分界的具体位置,有待野外详细工作确定。即使中下部的10~40 ka的钙华层,也不一定不是无间断的连续沉积。从张家沟钙华沉积韵律分析,一般厚度在几毫米至十几毫米,如果连续沉积的话,平均计算20多米厚的钙华大概几千年的时间即可形成。由实测的沉积

年龄最新为 10 ka,最老为 8 万多年,可以认为他们可能是多期次沉积形成的。

## 5 张家沟剖面钙华氧、碳同位环境记录及古环境重建

通过对大湾张家沟剖面进行系统的同位素分析,可以重建钙华形成时期的古环境变化,从而确定研究区的钙华沉积规律和环境演化特征。钙华的碳氧同位素曲线表示于图 4 及图 5。由图可见,氧和碳同位素  $\delta$  值的变化基本同步,但局部也有差异。氧和碳同位素  $\delta$  值的变化基本幅度为  $\delta^{18}\text{O}$  值  $-10.5\text{‰} \sim -14.1\text{‰}$  之间,  $\delta^{13}\text{C}$  值变化幅度为  $4\text{‰} \sim 8\text{‰}$  之间。两者大致可分 1, 2, 3 三个阶梯:  $\delta^{18}\text{O}$  平均值大致分别为  $-13.5\text{‰}$ ,  $-11.5\text{‰}$  及  $-13\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  值大致分别为  $4.5\text{‰}$ ,  $6.5\text{‰}$  及  $8\text{‰}$ 。  $\delta^{13}\text{C}$  值偏重幅度很大,表明地下水来自深部的  $\text{CO}_2$  (刘再华等, 2000) 以及来自溶解碳酸盐的  $\text{HCO}_3^-$  的量相对较大,这与本区  $^{14}\text{C}$  测年表面年龄普遍大幅度偏老,即原始  $^{14}\text{C}$  浓度被稀释的结果相一致。当然偏重的原因还与沉积作过程中,  $\text{CO}_2$  从水中不断逸出,轻同位素首先富集于气相、重同位素则富集于固相的结果有关。

据 O'neil 等(1969)若方解石沉积与水达到氧同位素交换平衡,则有:

$$1000\ln a_{\text{方解石,水}} = 2.78 \times 10^6 / T^2 - 2.89$$

$$\text{其中 } 1000\ln a_{\text{方解石,水}} \approx \delta^{18}\text{O}_{\text{方解石}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$$

据郭建强的资料(郭建强等, 2002),黄龙转花泉  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -14.10\text{‰}$  (SMOW),假设其在整个钙华的形成过程中不变,即沉积介质水  $\delta^{18}\text{O}$  为  $-14.10\text{‰}$ ;另外钙华沉积是在水下进行的,至少钙华表面也有一层水膜覆盖,这显然可以认为水介质与钙华之间达到同位素平衡。因此可以根据上式计算相对应的古钙华沉积形成时的泉水温度,计算结果在  $5 \sim 20\text{℃}$  之间,变化幅度为  $15\text{℃}$ 。如果考虑水的  $\delta^{18}\text{O}$  值在冰期与间冰期间的变化,那么水温的变幅将会小一些。通过钙华沉积时水的温度变化(图 5),可以看出地热的影响程度在发生变化,最高水温与该区现今年平均气温约高出  $15\text{℃}$ ,与现今黄龙转花泉年平均水温大体相当。可以设想,当年形成张家沟钙华的泉水与现今黄龙转花泉其源泉及循环

深度上大体相当,这与水文地质研究结果一致(郭建强, 2002; 四川地矿局成都水文队<sup>①</sup>, 1986, 1987)。

水温由老到新变化幅度较大,可能与该地区因青藏高原隆升被强烈抬升有关(余素华等, 1995),也可能与全球气候变化有关,具体情况有待进一步研究。

根据 U 系测年的结果整个剖面碳氧同位素记录大致可以分为两个时期,1 相当于海洋同位素 MIS5a,即 80 ka 前后(剖面上  $0 \sim 6\text{m}$ ),  $\delta^{18}\text{O}$  偏轻 ( $-13\text{‰} \sim -14\text{‰}$  之间),表明该阶段夏半年降水较多,夏季风强盛,气温较高;2 和 3 相当于海洋同位素 MIS3 和 MIS2 阶段,  $\delta^{18}\text{O}$  偏重 ( $-10.5\text{‰} \sim -13.0\text{‰}$  之间),气候干冷而变化较大(覃嘉铭, 2000, 2004)。

## 6 结论

(1) 本次研究首次对黄龙景区的钙华进行了 ICPMSU 系测年,确认大湾张家沟剖面的上段是本区最早形成的钙华,其年代为 80 ka 前后,应属晚更新世中期,中下段为  $1 \sim 4$  万多年,属晚更新世晚期。该剖面不是自下而上由老到新的正常层序,而可能是多期次(最少两期)沉积形成的;

(2) 通过对大湾张家沟钙华剖面氧同位素研究,重建了钙华形成过程的古温度变化。依据氧碳同位素记录,重建了钙华沉积过程中的古环境。张家沟剖面的上段,相当于海洋同位素 MIS5 a,即 80 ka 前后,  $\delta^{18}\text{O}$  偏轻 ( $-13\text{‰} \sim -14\text{‰}$  之间),说明该时期夏半年降水较多,夏季风强盛,气温较高;中下段,相当于海洋同位素 MIS3 和 MIS2 阶段,  $\delta^{18}\text{O}$  偏重 ( $-10.5\text{‰} \sim -13\text{‰}$  之间),气候干冷而变化较大;

(3) 通过对大湾张家沟钙华剖面的研究,初步建立了黄龙景区钙华的形成模式。张家沟钙华在 8 万多年前钙华沉积形成以后可能停止了沉积,停止沉积的时间段为  $40 \sim 70\text{ka}$  前后(也可能并未停止沉积,只是剖面上受到后来的风化冲刷,是我们未能找到而已)。到了晚更新世晚期张家沟钙华又再次沉积,并部分深部泉水开始分流于黄龙沟,开始在黄龙形成钙华沉积。到了全新世张家沟泉水完全断流,缺少钙华沉积,这时期泉水几乎集中于黄龙沟,从而形成了我们今日所见广泛发育的独特的黄龙钙

① 四川地矿局成都水文队. 1986, 1987. 黄龙、九寨沟旅游地质景观及矿泉水资源调查报告.

华景观。

致谢 野外工作在四川省地矿局区调队生态所的帮助和指导下共同完成,参加该项工作的还有冯玉梅、涂林玲、应启和、国土资源部岩溶动力学重点实验室的李强、杨琰同志和湛江海洋大学工程学院热能系张会领同志,中南民族大学覃璇同志给与英文翻译和指导在此一并致谢!

### 参考文献

- 陈先,朱学德,周绪伦. 1988. 黄龙风景区岩溶水及泉华沉积的同位素研究. 中国岩溶, 7(3): 209~212.
- 郭建强,彭东,杨俊义. 2002. 松潘黄龙水循环及钙华景观成因研究. 四川地质学报, 20(1): 21~26.
- 姜泽凡. 1990. 黄龙钙华及其沉积速率研讨. 四川地质学报, 10(4): 281~284.
- 刘再华,袁道先,何师意,等. 2000. 地热CO<sub>2</sub>-水-碳酸盐岩系统的地球化学特征及CO<sub>2</sub>来源—以四川黄龙沟、康定和云南中甸下给为例. 中国科学(D辑), 30(2): 209~214.
- 刘再华, K Yoshimura, Y Inokura. 2005. 四川黄龙沟天然水中的深源CO<sub>2</sub>与大规模的钙华沉积. 地球与环境, 33(2): 1~9.
- 李宏业,尹观,杨俊义,等. 2003. 四川牟尼沟水体的同位素地球化学特征. 地球学报, 24(6): 529~534.
- 冉江洪,刘少英. 2002. 黄龙自然保护区综合考察报告. 成都:四川林业出版社.
- 覃嘉铭,袁道先,程海,等. 2004. 过去25万年龄桂地区千年尺度东亚季风气候的变化. 中国岩溶, 23(4): 261~266.
- 覃嘉铭,袁道先,林玉石,等. 2000. 桂林4.4万年来自石笋同位素记录及其环境解释. 地球学报, 21(4): 407~416.
- 王华,李强,杨森. 2006. 钙华测年中不同方法的对比研究. 岩矿测试, 25(4): 306~310.
- 王华,张会领,覃嘉铭. 2004. “死碳”对<sup>14</sup>C年代测定的影响的初步探讨. 中国岩溶, 23(4): 299~303.
- 余繁华,文启忠. 1995. 试论青藏高原第四纪沉积地球化学演化与环境变迁. 海洋地质与第四纪地质, 15(4): 97~106.
- 周绪伦. 2006. 关于四川黄龙钙华CO<sub>2</sub>成因的讨论. 四川地质学报, 3: 17~20.

### References

- Chen Xian, Zhu Xuwen, Zhou Xulun. 1988. Research on isotopes of karst water and sinter from Huanglong scenery zone. *Carstological Sinica*, 7(3): 209~212 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jianqiang, Peng Dong, Yang Junyi. 2002. Study of water circulation and genesis of travertine landscape in Huanglong. *Acta Geologica Sichuan*, 20(1): 21~26 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zefan. 1990. Discussion on Huanglong travertine and its depositing

- velocity. *Acta Geologica Sichuan*, 10(4): 281~284 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zaihua, Yuan Daoxian, He Shiyi, et al. 2000. Geochemical features of the geothermal CO<sub>2</sub>-water-carbonate rock system and analysis on its CO<sub>2</sub> sources Examples from Huanglong Ravine and Kangding, Sichuan. *Science in China (Ser. D)*, 30(2): 209~214 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zaihua, K Yoshimura, Y Inokura. 2005. Deep source CO<sub>2</sub> in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sichuan, China. *Earth and Environment*, 33(2): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongye, Yin Guan, Yang Junyi, et al. 2003. Isotopic Geochemical Characteristics of Water Bodies in Munigou, Sichuan Province. *Acta Geoscientica*, 24(6): 529~534 (in Chinese with English abstract).
- Lu C, Donahoe R J. 2000. Controlling processes in a CaCO<sub>3</sub> precipitating stream in Huanglong Natural Scenic District, Sichuan, China. *Journal of Hydrology*, 230: 34~54.
- O'neal J R, Clayton R N, Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Journal of Chemical Physics*, 51: 5547~5558.
- Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. 2004. A millennial scale climatic changes of Eastern Asian Monsoon in the past 250000 years in Guizhou ang Guangxi, China. *Carology Sinica*, 23(4): 261~266 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Lin Yushi, Zhang Meiliang, Li Bin. 2000. Acta Isotopic Records of Stalagmites from Guilin since 44 kaB. P. and Their Environmental Interpretation, *Acta Geoscientica Sinica*, 21(4): 407~416 (in Chinese with English abstract).
- Ran Jianghong, Liu Shaoying. 2002. Synthetical report of Huanglong natural protect zone. Chengdu: Sichuan Forestry Press (in Chinese).
- Wang Hua, Zhang Hailing, Qin Jiaming. 2004. Study on dead carbon affecting <sup>14</sup>C age determination and its emendation. *Carology Sinica*, 23(4): 299~303 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hua, Liqiang, Yangyan. 2006. Contrastive research on different age mensuration of travertine. *Rock and Mineral Analysis*, 25(4): 306~310 (in Chinese with English abstract).
- Yu Suhua, Wen Qizhong. 1995. Discussion on quaternary geochemistry evolvement and environment vicissitude on Qingzang Plateau. *Ocean Geology and Quaternary Geology*, 15(4): 97~106 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xuelun. 2006. A Discussion on Genesis of CO<sub>2</sub> in the Huanglong Travertine, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 3: 17~20 (in Chinese with English abstract).