

青藏高原的大气 CO₂ 含量、岩溶溶蚀速率 及现代岩溶微地貌

章 典 师长兴

香港大学地理系

内容提要 青藏高原是世界上最高、最大和最年青的高原。按照气候地貌学的观点,其干燥和寒冷的气候条件不利于岩溶地貌的发育。笔者在青藏高原上已发现了广泛分布的岩溶微形态。笔者用国际通用的石灰岩圆形切片,在西藏三个不同地点进行了12年的野外溶蚀试验,揭示出青藏高原的岩溶溶蚀速率是全世界最低的,在土层中还产生沉淀现象。通过在青藏高原不同高程上测量大气中 CO₂ 分压,发现 P_{CO_2} 随海拔高度的增加而降低。在土壤、沉积物和岩石裂隙中的 P_{CO_2} 也呈现同样的变化趋势。由于 CO₂ 含量直接影响天然水的溶蚀能力,因此可以断定低 CO₂ 浓度是造成青藏高原上现代岩溶过程微弱的重要原因之一。其他主要原因包括干旱和寒冷气候条件。通过对不同微地貌上溶蚀速率的计算和形态分析,可以认为,分布于高原面上的所有岩溶微形态中,现代发育的岩溶微地貌形态仅仅是那些与生物岩溶过程有关的溶痕,其他岩溶微地貌形态可能是全新世温暖期的产物。

关键词 岩溶 CO₂ 溶蚀速率 青藏高原

青藏高原是一特殊的自然环境地带。寒冷和干燥的气候加上高海拔,给岩溶地貌的发育造成了不利的条件。但是近年来,在青藏高原内部发现了许多岩溶地貌形态,这些形态包括洞穴、溶痕类、灰华和洞穴化学沉积,其中洞穴发育最高海拔5600m。研究表明,这里几乎所有的洞穴都已经停止发育(Zhang, 1995),地表灰华和洞穴化学沉积也属于过去气候下的产物(Zhang, 1994, 1996, 1997; Waltham, 1993, 1996)。仅仅溶痕类形态被认为是现代岩溶作用的产物(Zhang, 1994)。它们包括雨痕(rainpit),梳状痕(rillenkarren),溶盘(solution pan),溶蚀裂隙(grike),曲流溶沟(meandering solution runnel)及壁溶沟(wall solution trough)等。不过,以往将这些溶痕判断为现代岩溶,仅仅基于溶痕外表破坏的程度,而没有对形成这些形态的岩溶溶蚀过程作深入的研究。

大气中 CO₂ 的含量(包括在地表空气、土壤、洞穴、松散沉积物及岩石裂隙中的 CO₂)决定了天然水的溶蚀能力,而岩溶过程可以用岩溶溶蚀速率来定量表示,因此对 CO₂ 含量和溶蚀速率的观测研究可以解释青藏高原现代岩溶形成的过程。国际洞穴联合会曾组织了一个联合研究项目,通过该项目在全

球60多个地区建立了观察站,对全球岩溶溶蚀速率进行了观测(Games, 1985)。中国国土资源部岩溶地质研究所也在中国19个地点对溶蚀速率进行了观测(袁道先, 1993)。但是在海拔超过3600m的青藏高原内部,除了笔者在1987~1988年间的短期观测之外(Zhang, 1997),还没有建立任何观测点。

1 观测地点及方法

笔者使用 Metrosonics 公司生产的 aq-5000 空气质量测试仪,对两个剖面不同高程上大气 CO₂ 含量进行了测量。第一个剖面从尼泊尔的加德满都到青藏高原内部的高山,于1998年夏季测量。另一个剖面从成都平原到高原北部,观测时间为1987年夏季、1988年冬季和1997年夏季。测量项目包括地表空气、土壤、洞穴、松散沉积物和岩石裂隙中的 CO₂。其次,自1987年开始,笔者从北向南在安多、拉萨和定日设置了观测点,对这三个代表性地区的岩溶溶蚀速率进行了观测。三个地区的气候特征如表1。观测点共6个,其中包括3个试坑点(拉萨莲花宾馆、安多兵站、定日者不日山脚)和3个地形点(拉萨西山、安多北山和定日者不日山腰)。试坑点的建立是按照国际上通用方法,即挖掘0.5m深的试坑,

收稿日期:2001-12-25;改回日期:2002-07-15;责任编辑:周健。

作者简介:章典,1991年获英国曼彻斯特大学博士学位。现为香港大学地理系副教授,博士生导师,从事岩溶、地貌、水化学和环境科学的教学与科研工作。通讯地址:香港大学地理系。

将用南斯拉夫灰岩和广西融县灰岩做成的圆形试片(直径 42 mm, 厚度 3 mm), 分别水平放置于地表以下 0.5 cm 处的松散沉积物中、土壤与松散沉积物交界处、土壤表面以及距地面 1 m 的空气中(图 1)。地形点的试样则放置于溶痕表面、土壤覆盖的痕溶下(图 2a)和岩石冲沟的底部及壁部(图 2b), 后者主要用于观察水流的沟状流和片流之间的溶蚀差异。

表 1 3 个试坑点的气候特征

Table 1 Climatic factors of the three field experimental stations

地区	降水量(mm)	年平均温度(°C)	年平均蒸发量(mm)
拉萨	480	6	2200
安多	380	-3	1760
定日	250	3	2550

2 观测结果及分析

2.1 CO₂ 含量

观测结果显示两剖面上大气 CO₂ 含量没有方向上的差异, 季节性差异也不明显, 因此综合绘于图 3 中。可以看出, 大气 CO₂ 的含量是随高程增加而减小的。这符合大气密度变化的规律, 即海拔高度愈高, 空气密度愈小。同样, 土壤、沉积物和岩石裂隙中的 CO₂ 也是基本符合以上规律的(图 4), 但是浓度一般要比地表空气中的高, 特别是土壤中的 CO₂ 浓度要高于地表 5~20 倍, 这是由于植物和其他有机质所逸出的 CO₂ 所致。另外, 土壤中的 CO₂ 也不像

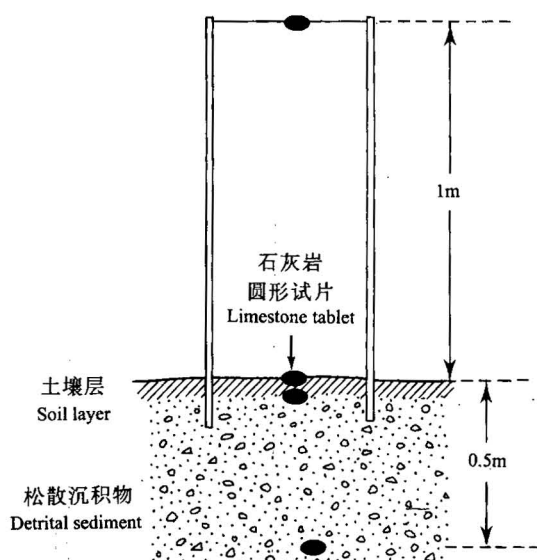


图 1 野外溶蚀试坑点剖面

Fig. 1 The vertical profile of field experimental station for limestone dissolution

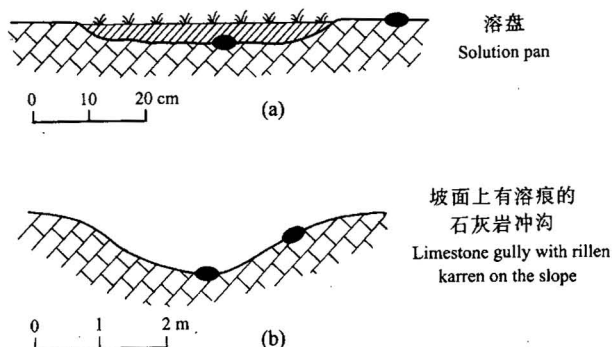


图 2 野外溶蚀地形点剖面

Fig. 2 Landform positions of limestone tablets

(a)—溶盘点; (b)—冲沟点

(a)—Solution pan; (b)—gully

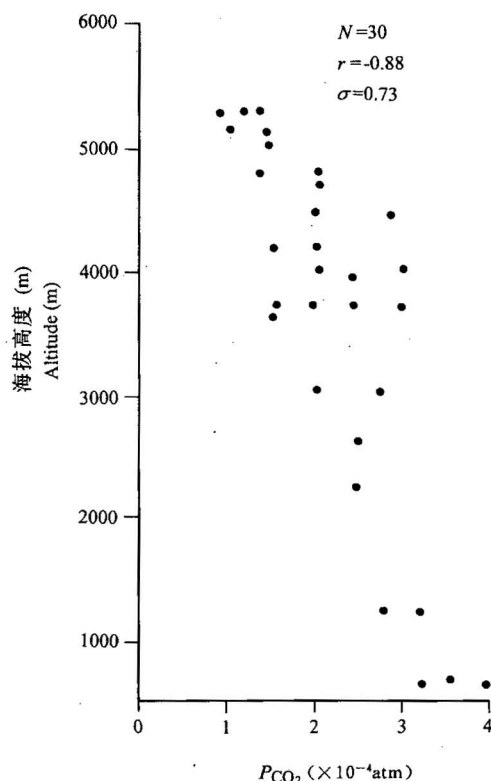


图 3 青藏高原大气 CO₂ 分压随高程的变化

Fig. 3 Atmospheric CO₂ partial pressures and altitudes on the Tibetan Plateau

N—样本数; r—相关系数; σ —标准方差

N—Number of samples; r—correlation coefficient; σ —standard deviation

在热带、亚热带和温带岩溶区那样有明显的季节差异(袁道先, 1993)。至于洞穴中 CO₂ 含量, 在不同的高程上变化都不大。高原内部的洞穴 CO₂ 含量不随海拔高程增高而减低。通过对这些洞穴的观察, 发现由于青藏高原内部缺少植被, 动物把洞穴作为它们

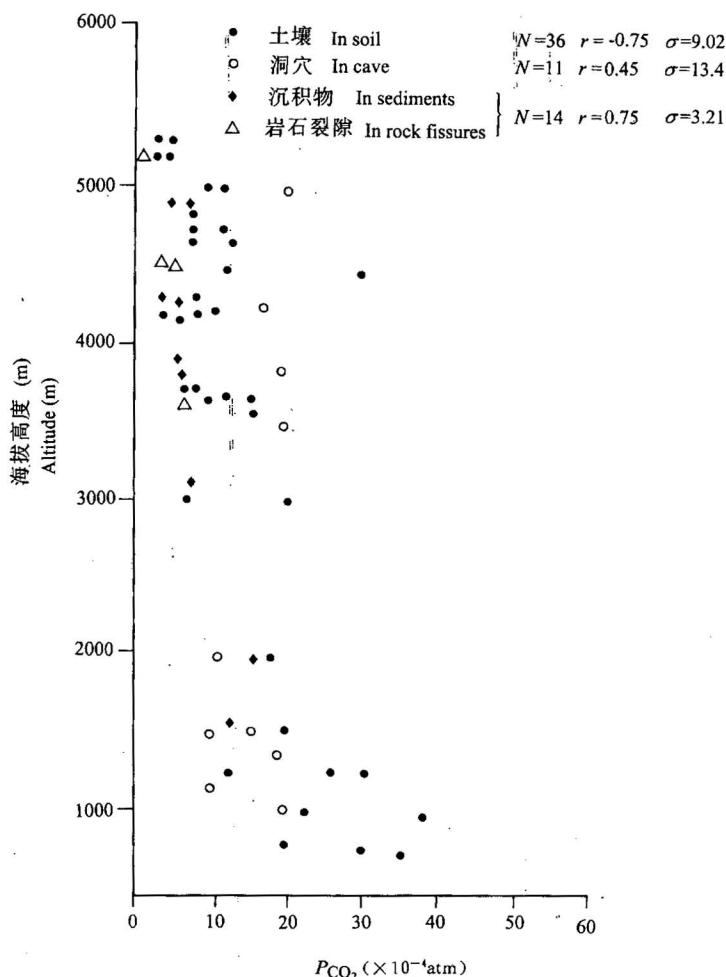


图 4 青藏高原土壤、洞穴、沉积物和岩石裂隙中的 CO_2 分压随高程的变化

Fig. 4 CO_2 partial pressures in soil, cave, sediment and rock fissure of the Tibetan Plateau

代号同图 3

The symbols same as in the Fig. 3

的栖息地,动物的排泄物和尸体腐烂后可以释放出大量 CO_2 ,可能是造成高原面上洞穴内的 CO_2 含量增高的原因。

从大气 CO_2 的垂直分布可以看出,高原面上的大气 CO_2 分压要比平原地区低 30%~60%,而且其他 CO_2 含量也明显低于低海拔地区的平均水平。这种情况造成了青藏高原大气降水碳酸含量较低,降水侵蚀性较弱。因此,与其他具有相同降雨量的地区相比,这一地区岩溶水的溶蚀作用要低。

2.2 溶蚀速率

放置试样近 12 年后,除了三个地形点的 9 个试样失落外,其他所有试坑点和部分地形点的 30 个试样都成功地找到了,并且这些样品有地区和地形上的代表性。样品取回后,经过称重并按下列公式计

算溶蚀速率:

$$Sr = \frac{(W_2 - W_1)}{2.7A \cdot t}$$

式中, Sr 为溶蚀速率 (mm/ka), W_1 和 W_2 代表样品在试验前后的重量, t 为试验时间, A 表示试样的表面积 (mm^2), 常数 2.7 是石灰岩比重。

经过计算,得到近 12 年来受自然风化作用后样品所发生的变化,结果列于表 2 中。通过对样品的分类后,可以看出这些变化有地区性、垂直性和地形性的变化规律(表 3)。

2.2.1 地区性的变化

从平均重量损失上来说,拉萨地区的样品是最大的,安多第二,定日最小,但安多的地表空气中样品重量损失高于拉萨的。在显微镜下观察,发现安多空气中的样品均受到了寒冻风化的破坏以及冰雹的撞击。因此,地区性的溶蚀差异应该从气候条件上考虑。拉萨是三个地区中最暖和和最湿的地区,地表植被发育远比其他地区为佳,因此样品的溶蚀速率较高。在定日,虽然温度比安多高,但降雨量低于安多,蒸发大大高于其他地区,在该区样品的重量是增加,而不是减少。这是由于定日处于喜马拉雅山的雨影带,其太阳辐射量 (210 kcal/cm^2) 是世界上最高的地区之一。少雨和强烈的太阳辐射造成了强烈的蒸发(见表 1)。在这种气候下,降水到达地面后,在较短的时间内就被蒸发,所以在沉积物中产生了方解石沉积,这可从试样上新方解石的沉积所证实。在整个青藏高原上的石灰岩地区,地表灰华、沉积物中的钙质团块和钙板、石灰岩表面的钙质薄膜普遍发育,应该是强烈蒸发作用的结果。

2.2.2 垂直剖面上的变化

在试坑样的垂直剖面上,所有置于松散沉积物中的样品都增加了重量。这与世界上其他地区的观察结果不一样。通过显微镜观察发现,重量增加的样品都有新方解石沉积。在定日,甚至在土壤和沉积物交界面的样品上都产生了沉积。

三个试坑样中,置于土壤表面的样品重量损失最大,这与原来所期望的最高溶蚀速率发生的位置不同。原来预测最高速率发生在土壤与沉积物交界处,因为土壤中入渗水 CO_2 含量较高,流经样品时应该具有较高的侵蚀性。事实上,由于青藏高原上强

表 2 青藏高原石灰岩试样野外溶蚀速率

Table 2 Field dissolution rates of the limestone tablets on the Tibetan Plateau

样品号	样品来源	试验时间(a)	地点/海拔(m)	位置	失重(mg)	溶蚀速率(mm/ka)
S1	Y	11.8	拉萨/3680	距地面 1m 的空气中	50	1.14
S2	C	11.8	拉萨/3680	距地面 1m 的空气中	40	0.86
S3	C	11.8	拉萨/3680	距地面 1m 的空气中	56	1.28
S4	Y	11.8	拉萨/3680	土壤表面	226	5.18
S5	C	11.8	拉萨/3680	土壤表面	365	8.34
S6	C	11.8	拉萨/3680	土壤表面	210	4.76
S7	Y	11.8	拉萨/3680	土壤和沉积物界面	39	0.88
S8	C	11.8	拉萨/3680	土壤和沉积物界面	164	3.76
S9	C	11.8	拉萨/3680	土壤和沉积物界面	71	1.63
S10	Y	11.8	拉萨/3680	沉积物中 -0.5m	-143	-3.28
S11	C	11.8	拉萨/3680	沉积物中 -0.5m	-210	-4.76
S12	C	11.8	拉萨/3680	沉积物中, -0.5m	-26	-0.89
S23	C	10.6	安多/4820	距地面 1m 的空气中	109	2.78
S24	C	10.6	安多/4820	距地面 1m 的空气中	34	0.77
S17	C	11.8	安多/4820	土壤表面	69	1.58
S18	C	11.8	安多/4820	土壤表面	96	2.19
S19	Y	11.8	安多/4820	土壤和沉积物界面	38	0.87
S20	C	11.8	安多/4820	土壤和沉积物界面	-23	-0.52
S21	Y	11.8	安多/4820	沉积物中, -0.5m	-39	-0.89
S22	C	11.8	安多/4820	沉积物中 -0.5m	-207	-4.74
S27	C	10.6	定日/4570	距地面 1m 的空气中	42	1.07
S27	C	10.6	定日/4570	土壤表面	37	0.94
S29	C	10.6	定日/4570	土壤和沉积物界面	-29	-0.74
S30	C	10.6	定日/4570	沉积物中, -0.5m	-370	-9.43
S13	C	11.8	安多/4840	冲沟底部	49	1.12
S15	C	11.8	安多/4840	冲沟坡面	29	0.67
S14	C	10.6	拉萨/3890	有溶痕的冲沟坡面	72	1.84
S16	C	10.6	拉萨/3890	冲沟底部	36	0.91
S25	C	10.6	拉萨/3890	土壤覆盖溶盘底部	416	10.49
S26	C	10.6	拉萨/3890	溶盘底部	81	2.60

注: Y—南斯拉夫灰岩样(国际标准样); C—广西融县灰岩样(中国标准样); 负值为试样重量增加量。

表 3 石灰岩试样在青藏高原不同地区和不同位置的平均野外溶蚀速率(mm/ka)

Table 3 Average field dissolution rates (mm/ka) of the limestone tablets in different regions and landform locations on the plateau

地区	空气	土壤表面	土壤和沉积物界面	沉积物中	平均
拉萨	1.09	6.09	2.09	-2.98	1.57
安多	1.78	1.89	0.18	-2.82	0.26
定日	1.07	0.94	-0.74	-9.43	-2.04
平均	1.31	2.97	0.51	-5.07	-0.07

注: 负值为试样重量增加量。

烈的蒸发作用,加之土壤层很薄,当水流到达土壤层底部时已被部分蒸发掉,所以其侵蚀量减少,甚至产生沉积。相反,在土壤表面,由于有雨水溶蚀,底部又有生物岩溶作用,所以造成了较高的溶蚀速率。

2.2.3 不同地形位置上的变化

在土壤覆盖下的溶盘中试样具有最高的溶蚀速率,相反在溶盘边缘的石灰岩表面上的溶蚀速率相对很少。这一现象与溶盘的发育过程有关。因为土

壤下的石灰岩是不透水的,降水入渗到石灰岩表面发生聚集,使该界面长期保持湿润,从而促进生物活动。生物活动所释放的 CO₂ 和酸类增加了水的侵蚀性,所以该处溶蚀速度是最快的。

放置在石灰岩冲沟壁与冲沟底部的样品分别反映了片状水流条件下和槽状水流条件的溶蚀速率。从试验结果看,它们之间的差异相对较小。这是因为,虽然冲沟底部水量较多,但是根据水化学反应速度衰减规律,这些水已经过了它们最初的快速溶蚀阶段,侵蚀性已经降低。

2.2.4 现代岩溶形态的形成

通过对比不同环境下的溶蚀速度,可以对岩溶形态及形成速度进行估算。

根据在溶盘底部和边缘灰岩表面的溶蚀差异,我们可以算出在土壤覆盖之下石灰岩表面岩溶形态形成的速度。一般来说,这些与生物岩溶有关的形态的最小尺寸为毫米级。在土壤覆盖下的溶盘溶蚀速率是 10mm/ka 左右,而附近暴露于空气中的岩石表面的溶盘溶蚀速率是 0.86~2.78mm/ka。因此,按这种溶蚀速率上的差异,在拉萨地区,产生一个毫米级的生物岩溶形态,只需要几百年的时间。所以现在在高原内部较为暖湿地区发现的与生物岩溶有关的溶痕是现代岩溶作用的结果,而那种由水流流态差异造成的形态,例如梳状痕,曲流槽,可以用冲沟内溶蚀差异结果来估算。对于厘米级的石灰岩表面水流溶痕的形成,按照上述实测溶蚀差异计算,需要上万年的时间。由此可以认为,这些地表水流形成的岩溶形态不是现代气候条件下的产物。但是,在某些地貌部位,例如冰川边缘,由于汇集大量融雪水,溶沟可能在较短时间内形成。

3 结论

高海拔地区大气低 CO₂ 分压是造成降水具有低侵蚀性,以至岩溶溶蚀过程非常微弱的主要原因。所以,与世界上其他地区和中国其他省份岩溶溶蚀速率相比(Sweeting, 1966; Atkinson et al., 1976; Kirk, 1985; Peterson, 1982; Spate et al., 1985; Trudgill, 1985),青藏高原内部的溶蚀速率是最低的。除此之外,气候条件也是造成低溶蚀速率的主要原因,其中降雨量和蒸发量扮演着重要的角色。这与全球石灰岩溶蚀速率的结论相一致(Gams, 1985; Zhang et al., 1995)。强烈的辐射导致高蒸发量和高干燥度,当降水到达地面时,化学溶蚀反应的时间非常短,水很快达到饱和,甚至完全蒸发。已溶解的碳

酸钙又变成固体沉积下来,形成各种钙质沉积。相对而言,温度对溶蚀速率的作用不是十分明显。温度和蒸发量在一起可以影响生物活动性,但这种影响很难从溶蚀速率实测数据中区别出来。

现在在高原内所发现的梳状痕、雨痕等部分溶痕类形态不是现代岩溶作用的产物。它们可能是在全新世较温湿气候下的产物,并保存到现在。溶盘、壁溶槽等与生物岩溶有关的溶痕类很可能是在现代气候条件下于土壤下发育形成。至于那些发育于高山上的曲流槽和微洞穴等,都与高山融雪水流有关,不代表高原现代岩溶作用。因此可以说,现代青藏高原的岩溶作用非常微弱,仅仅生物岩溶作用可以产生现代岩溶微地貌形态。

参 考 文 献

袁道先. 1993. 中国岩溶学. 北京:地质出版社, 26~29.

References

- Atkinson T C, Smith D I. 1976. The erosion of limestones. In: Ford T D, Cullingford C H, eds. *The Sciences of Speleology*. London: Academic Press, 151~177.
- Games I. 1985. International comparative measurements of surface solution by means standard limestone tablets. *Razprave IV*. Razprave Saza, XXVI, 361~386.
- Kirk R M. 1985. Rates and forms of erosion on the intertidal platforms at Kaikoura Peninsula South Island, New Zealand. *N. Z. Geol. Geophys.*, 20: 571~613.
- Peterson J A. 1982. Limestone pedestals and denudation estimates from Mt. Java, Irian Java. *Aust. Geogr.* 15: 170~173.
- Spate A P, Jennings J N, Smith D I, Greenaway M A. 1985. The micro-erosion meter: use and limitation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 427~440.
- Sweeting M M. 1966. The weathering of limestones, with particular reference to the Carboniferous limestones of northern England. In: Dury G H, ed. *Essays in Geomorphology*. London: Heine-mann, 177~210.
- Trudgill S. 1985. *Limestone Geomorphology*. London and New York: Longman.
- Waltham A C. 1993. Limestone and karst in Tibet. In: Waltham A C, Willis R G, eds. *Xingwen, China Cave Project*. British Cave Research Association, 40~42.
- Waltham A C. 1996. Limestone karst morphology in the Himalayas of Nepal and Tibet. *The Annals of Geomorphology*, 40(1): 1~22.
- Zhang D D, Fischer H, Bauer B, Pavuza R, Mais K. 1995. Field tests of limestone dissolution rates in karstic Mt. Krauterin, Austria. *Cave and Karst Sciences*, 21(2): 101~104.
- Zhang D D. 1994. Morphogenetics and distribution of Tibetan Karren. *Carsological Sinica*, 13(3): 270~280.
- Zhang D D. 1995. Geology, palaeohydrology and evolution of caves in Tibet. *Cave and Karst Sciences*, 21(3): 111~114.
- Zhang D D. 1996. A morphological analysis of Tibetan limestone pinnacles: are they remnants of tropical karst towers and cones? *Geomorphology*, 15: 79~91.
- Zhang D D. 1997. Contemporary karst solution processes on the Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 17(2): 135~144.

CO₂ Partial Pressure, Karst Dissolution Rate and Karst Micro-landforms on the Qinghai-Tibet Plateau

David Dian ZHANG, SHI Changxing

University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong

Abstract

The Qinghai-Tibet Plateau is the highest, largest and youngest plateau in the world. Its arid and frigid climatic conditions are not suitable for the development of karst landforms based on the principles of climatic geomorphology. However, the authors have found many micro-forms of karst features in most of places of the plateau. Therefore, the development of the karst micro-landforms on this plateau needs to be investigated. The international standard tablets for examining limestone dissolution rate have been placed in field for 12 years and the experiment reveals that the karst dissolution rate on the plateau is the lowest in the world. With the reference to the CO₂ partial pressures that were measured on different elevations, the authors believe that the lower CO₂ pressure on the plateau, which is caused by high altitude, is one of the major causes responsible for the lowest dissolution rate. Other causes include arid and frigid conditions. Based on the results from calculation of the dissolution rates and analysis of karst geomorphology, it can be concluded that the active micro-landforms belong to bio-karst features and the appearance of other micro-landforms may be related to the warm periods in Holocene.

Key words: karst; CO₂; dissolution rate; Qinghai-Tibet Plateau