

刘锋, 赵越, 宋立才, 等. 伊洛瓦底江上游水系形成时代研究——以滇西龙川江为例[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 199–206.

Liu Feng, Zhao Yue, Song Licai, et al. Time of the upper Irrawaddy streams: A case study of the Longchuan River, western Yunnan[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 199–206(in Chinese with English abstract).

伊洛瓦底江上游水系形成时代研究 ——以滇西龙川江为例

刘 锋 赵 越 宋立才 李建锋

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 研究伊洛瓦底江水系的发育历史对理解青藏高原东南缘的生长具有重要意义, 但是长期以来对其形成时代的研究一直比较薄弱。通过研究伊洛瓦底江上游支流的演化可为认识其水系的发育提供重要线索。龙川江是伊洛瓦底江的一级支流, 发源于高黎贡山, 流经腾冲芒棒盆地。研究表明在上新世时期芒棒盆地曾被一中型湖泊所占据, 现代意义上的龙川江并不存在。龙川江在芒棒盆地内同时切割了上新世中晚期和早更新世的火山岩, 腾冲地区早更新世火山岩的 K-Ar 年龄为 0.84~1.4 Ma, 说明现代龙川江的出现可能不会早于 0.80 Ma, 由此推测伊洛瓦底江上游水系可能也是 0.80 Ma 以来形成的。晚新生代以来东喜马拉雅构造结的强烈构造活动可能是其水系形成与演化的动力来源。

关键词: 东喜马拉雅构造结; 伊洛瓦底江; 龙川江; 河流地貌; 火山岩

中图分类号: P542+.3; P933 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)01-0199-08

Time of the upper Irrawaddy streams: A case study of the Longchuan River, western Yunnan

LIU Feng, ZHAO Yue, SONG Li-cai, LI Jian-feng

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The formation of the Irrawaddy River system was closely associated with the growth of the Tibetan Plateau. Hindered by difficulties in approaching the steep and rugged terrain in field reconnaissance, researchers have failed to clearly understand the formation time of the Irrawaddy River. The formation history of the tributaries of its upper reach can provide important implications for understanding the formation of the modern Irrawaddy River watershed. The Longchuan River which flows through the Mangbang basin in Tengchong area is the first grade tributary of the Irrawaddy River. Studies show that a paleolake existed and the modern course Longchuan River was not formed in the Mangbang basin in Pliocene. The Longchuan River established its modern path after early Pleistocene. This interpretation is based on the channel morphology with which the Longchuan River carved its course through the middle and late Pliocene and Pleistocene volcanic rock coherently. The age of the Pleistocene volcanic rock is

收稿日期: 2014-07-21; 改回日期: 2014-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171009)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(DZLXJK201309)和中国地质调查局项目(1212011120099、12120114002101)联合资助。

作者简介: 刘锋, 男, 1979年生, 博士, 构造地质专业, 主要从事构造地貌及地质灾害研究; E-mail: casinsar@126.com。

about 0.84–1.4 Ma in Tengchong. From the age of the Longchuan River, the authors infer that the modern Irrawaddy River system was built not earlier than 0.84 Ma. The northward propagation of the eastern Himalaya syntaxis might have supplied an important tectonic driver for the landscape evolution of Irrawaddy from late Cenozoic to the present.

Key words: Eastern Himalayan syntaxis; Irrawaddy River; Longchuan River; Fluvial geomorphology; Volcanic rock

About the first author: LIU Feng, male, born in 1979, doctor, mainly engages in the study of tectonic geomorphology and geological hazards; E-mail: casinsar@126.com.

作为青藏高原十大水系之一的伊洛瓦底江,其演化发育过程与青藏高原的生长有着密切关系^[1],然而对其河流演化历史的研究却比较薄弱。青藏高原东南缘的大型水系的演化历史十分复杂,水系经过多次重组^[1,2],现今各水系及其支流的源头蕴含着丰富的河流演化历史的信息^[2]。因此,通过研究

伊洛瓦底江水系上游支流的形成与演化很可能是认识其发育演化开始时间的突破口。

龙川江是伊洛瓦底江上游的一级支流,发源于高黎贡山,流经腾冲芒棒盆地,于缅甸境内汇入伊洛瓦底江(图1-a)。芒棒盆地中发育了一套以砂砾层、玄武岩和硅藻土等为主的上新世地层,具有多个火山喷

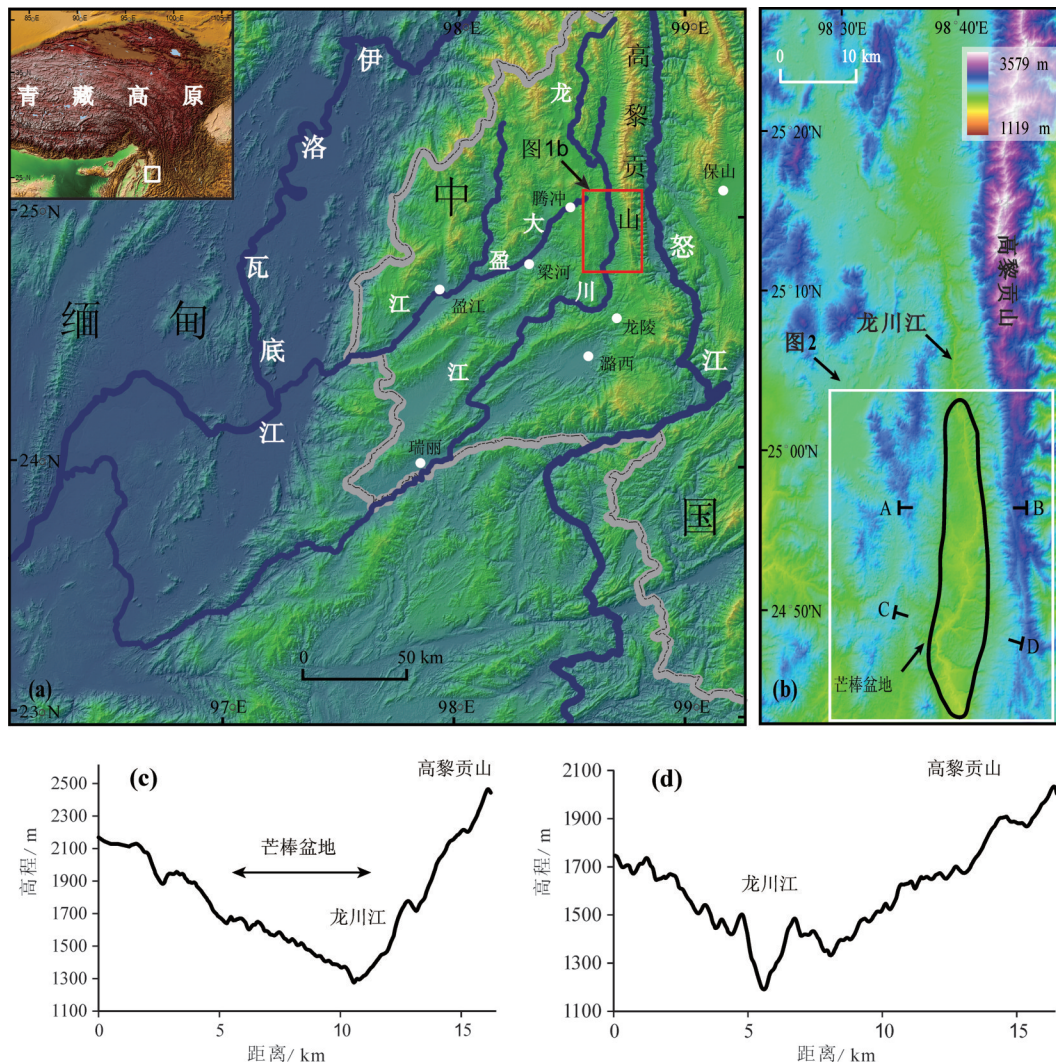


图1 芒棒盆地及龙川江河流横剖面特征图(剖面AB (c), 剖面CD (d))
 Fig.1 The Mangbang basin and topographic profiles of the Longchuan River
 (The topographic profile AB(c), The topographic profile CD(d))

发-沉积旋回特征,被称为芒棒组(N_2m)^[3]。前人对芒棒组地层沉积物的地质时代和沉积环境开展了大量的研究工作^[4-6],然而对该套地层的地貌意义,即流经芒棒盆地的龙川江的形成发育与芒棒组地层究竟有着何种关系,至今却鲜有研究。

本研究采用遥感影像解译和数字高程模型(DEM)数据分析,获取若干关键河段的精确的河谷断面参数,并通过野外调查龙川江对芒棒组地层的切割关系,分析龙川江的发育和芒棒组地层的联系,进而探讨伊洛瓦底江上游水系的形成时代。

1 研究区概况

处于印度板块俯冲碰撞前缘的腾冲地区自上新世以来发生过多期火山活动,火山区的东西边界分别是高黎贡大型韧性走滑剪切带和那邦大型韧性走滑剪切带。高黎贡和那邦大型韧性走滑剪切带具有早期(22~19 Ma)右行大规模走滑运动^[7,8],与三江构造带东部的哀牢山—金沙江大型左行走滑构造带一起构成三江地区地块向南挤出的左、右边界^[9-11],并在后期(13~11 Ma)又经历了一次左行的运动学特征^[8,12]。8~5 Ma间印度板块的进一步俯冲,腾冲地块发生了向南的挤出和顺时针的旋转,促成了一系列与此前右旋走滑相关的盆地的折返和南北向凹陷盆地的形成,制约了腾冲火山岩的喷发和整个地区的快速抬升^[8]。

约5 Ma以来腾冲地块发育了一系列沿走滑断裂或伸展断裂分布的沉积盆地^[13],例如腾冲地区的芒棒盆地。芒棒盆地位于高黎贡山西侧,为一近SN走向的山间断陷盆地(图1-b),北窄南宽。盆地基底东陡西缓,沉积岩、变质岩及中酸性的花岗岩构成基底岩石的主体。芒棒盆地的东侧为古生代高黎变质岩带,西侧为勐连花岗岩体。盆地内出露芒棒组地层及早更新世的火山岩(图2-a)。芒棒组地层的火山岩的K-Ar年龄值在2.7~3.6 Ma^[14,15]。

现代伊洛瓦底江源头有东西两支,东支流恩梅开江发源于中国境内察隅县境伯舒拉山南麓,西支流迈立开江发源于缅甸北部山区,其绝大部分河段在缅甸境内,最后流入孟加拉湾。龙川江属于伊洛瓦底江水系,发源于高黎贡山西侧,其上游流经腾冲火山岩分布区,中游流经芒棒盆地而发育于上新世芒棒组地层中(图2-a),受盆地构造影响河谷形

态呈现不对称的特征(图1-c),并且部分河段受火山岩影响形成峡谷地貌(图1-d),最后于缅甸境内汇入伊洛瓦底江(图1-a)。

2 上新世芒棒盆地沉积特征

2.1 帕连芒棒组剖面

在腾冲县五合乡帕连村北一条近东西向的龙川江支流内,芒棒组地层出露较为完整(图3)。其中下段(N_2m^1)地层的底部为含砾粗砂岩(图4-a),上覆薄煤层(图4-b),其上开始出现细砂岩夹含砾粗砂岩、砂质泥岩,最上部为砂质泥岩(图4-c)。总体上该段地层的沉积物粒度从下往上变细,并夹有煤层。因此,沉积环境应为湖相并兼有沼泽相。芒棒组下段(N_2m^1)地层与上覆中段(N_2m^2)玄武岩呈不整合接触。芒棒组中段(N_2m^2)地层为玄武岩和安山质玄武岩,上部气孔构造发育,下部为灰黑色致密块状结构(图4-d),致密块状玄武岩和气孔状玄武岩呈互层状,以持续喷发、无沉积夹层为特点。芒棒组上段(N_2m^3)地层分为2个亚段:下部为砂岩、含砾粗砂岩夹褐煤层,煤层厚约1.5 m(图4-e);上部地层为泥岩、粉砂质泥岩夹硅藻土层(图4-f)。煤层的出现表明沉积环境为沼泽相,硅藻土的出现则为浅湖相。此外,整个剖面没有河流相物质出现,说明上新世时期芒棒盆地曾存在一个封闭的湖泊,而没有河流出现。

2.2 城子门—官田芒棒组剖面

由于腾冲地区植被覆盖严重,为了进一步验证上述剖面所揭示的沉积特征,从城子门村开始经曼乃村直到高黎贡山下的官田村调查芒棒组的地层沉积特征。与帕连剖面不同的是,城子门—官田剖面芒棒组下段(N_2m^1)沉积序列较为完整。调查发现芒棒组下段(N_2m^1)的基本层序类型为由粗变细再变粗,自下而上依次为含砾粗砂,细砂、泥炭层、粉砂质泥岩、含砾粗砂和火山碎屑。并且在上部的含砾粗砂层发现了树木化石(图5-a)。化石所在的沉积层出现平行层理,并且沉积物粒度发生明显变化(图5-b),说明树木是被沉积物迅速掩埋。此外,在该段地层中发现了硅藻土层(图5-c)。芒棒组中段(N_2m^2)玄武岩上部气孔构造发育,岩石中节理裂隙发育(图5-d)。在玄武岩顶部发育了一层厚1~1.5 m芒棒组上段(N_2m^3)的硅藻土层(图5-e)。芒棒组下

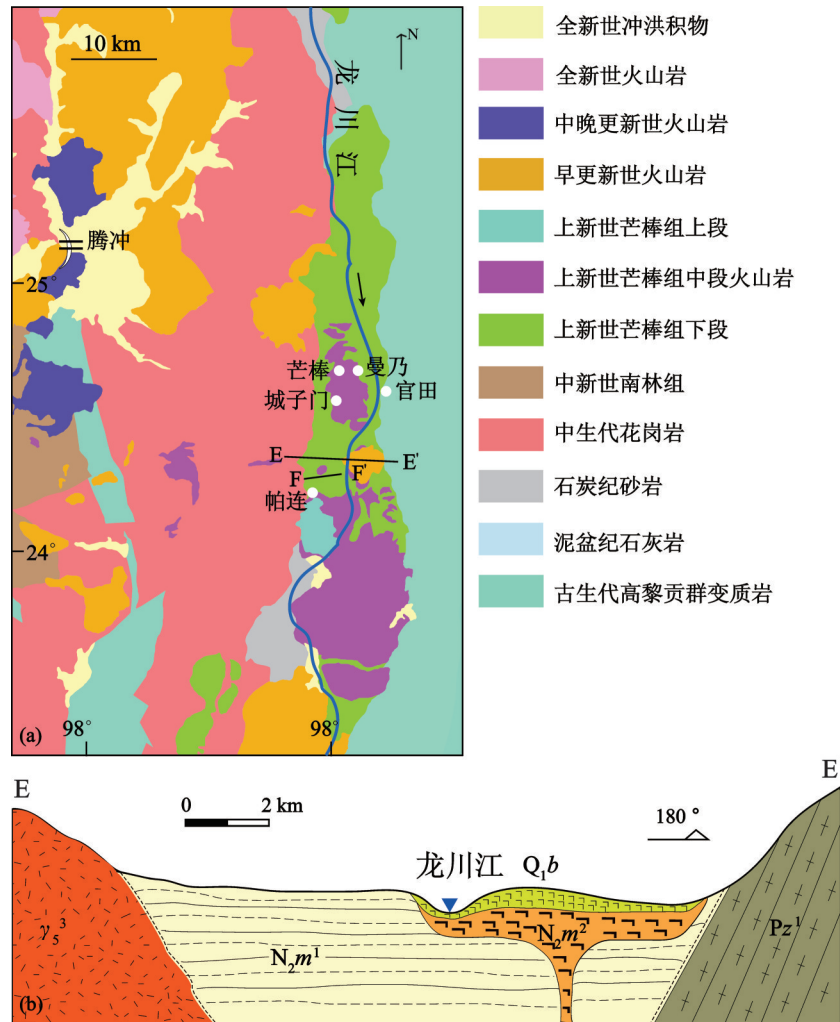


图2 研究区地质简图(a);与地质剖面图(b);FF'为野外实测地质剖面位置;EE'地质剖面来自文献[3]

Fig.2 a-Geological map of the study area, FF' is the geological profile, see Fig. 3; b-EE' geological profile derived from reference [3]
 N_2m^1 -Lower part of the Mangbang Formation; N_2m^2 -Middle part of the Mangbang Formation; Q_1b -Early Pleistocene basalt

段(N_2m^1)和上段(N_2m^3)地层中的硅藻土沉积层指示了湖泊静水环境的存在。在芒棒组上段(N_2m^3)的硅藻土之上发现了一套粗砂岩(图5-f),说明当时盆地周缘山体抬升并被剥蚀,向盆地内输送了大量物质,使得湖泊面积开始收缩。与帕连剖面类似,在城子门—官田剖面也没有河流相物质出现。

3 讨论

沉积环境分析显示上新世时期芒棒盆地中发育了古湖泊,前人认为是一个中型湖泊^[5]。芒棒组沉积上段和下段粗砂、细砂和粉砂质泥岩交替出现,并含有泥炭层和硅藻土,表明在芒棒盆地曾经

频繁的出现湖进湖退的现象。这可能与此时期频繁的火山活动和温湿的古气候有关。上新世时期大量的以火山岩为主的火山物质挤占了湖盆的空间,故而出现了湖退。而此时腾冲气候较现在温暖湿润^[16],在火山活动趋于减弱或者停止的时候,丰富的降雨可能会促使湖面再次扩大。值得注意的是,在整套芒棒组地层没有发现河流相物质,说明现代龙川江在上新世时并没有形成。此外,龙川江在芒棒盆地内同时切割了上新世芒棒组中段(N_2m^2)和早更新世的火山岩(图2-b),也证明其至少应该是在早更新世以后才出现在芒棒盆地。前人研究表明腾冲地区早更新世火山岩的K-Ar年龄为(0.842±

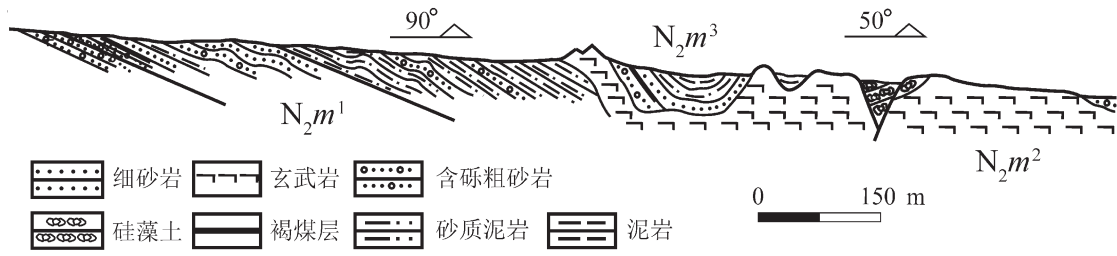


图3 帕连村芒棒组地层实测剖面(图2-a中FF'剖面)

N_2m^1 —芒棒组下部; N_2m^2 —芒棒组中部; N_2m^3 —芒棒组上部

Fig.3 Measured geological section of the Mangbang Formation at the site of Palian Village

N_2m^1 —Lower part of the Mangbang Formation; N_2m^2 —middle part of the Mangbang formation; N_2m^3 —upper part of the Mangbang Formation



图4 帕连村芒棒组地层典型照片(说明见正文)

Fig.4 Typical photographs of the Mangbang Formation at Palian Village



图5 城子门至官田芒棒组地层典型照片

Fig.5 Typical photographs of the Mangbang Formation from Chengzimeng Village to Guantian Village

0.15)~(1.57±0.44) Ma^[15],因此,现代龙川江的年龄可能不超过0.80 Ma。必须指出的是由于受到早期的仪器设备、测试技术水平等客观因素的限制,上述火山岩地层年龄可能存在较大的误差。另外,火山岩是河流地貌研究中一个理想的地貌标志层^[17],其具有抗侵蚀、易保存,可被准确定年的特点^[18]。在火山喷发的地区,河流如果直接发育在火山岩上,那么其发育

历史不应早于火山岩的形成时代。因此,对火山岩的年龄仍需做进一步的详细研究。

龙川江是伊洛瓦底江上游的一级支流,它的出现可能意味着伊洛瓦底江水系的建立。因此,从龙川江芒棒段的发育历史可以推测伊洛瓦底江上游水系的形成时间不应当太早,很可能是0.80 Ma以来的事件,这一时间与云南高原现代地貌格局的建

立也是较为一致的。云南断陷盆地结束沉降转为剥蚀的时间为1.0~1.4 Ma,表明云南高原较大规模整体抬升可能从此开始^[19]。此外,古气候研究表明作为伊洛瓦底江和怒江分水岭的高黎贡山最早可能也是在上新世晚期才开始隆升^[20, 21]。上述研究结果说明伊洛瓦底江上游水系地貌年龄比较年轻。需要指出的是本文只是研究了龙川江的部分河段,事实上,在腾冲地区除了龙川江外,大盈江也是伊洛瓦底江的一级支流,对这2条支流及伊洛瓦底江干流源头形成时代的研究才有可能清晰地认识伊洛瓦底江上游水系的演化历史,这也是将来需要进一步深入研究的。

伊洛瓦底江水系的形成可能与东构造结晚新生代以来的构造演化有着密切联系。上新世中期大约5 Ma时,由于澳大利亚大陆与东南亚的碰撞,引发东喜马拉雅构造结强烈作用于亚洲大陆^[22-24]。与此同时,周围古老克拉通陆块对青藏高原年青的特提斯造山区的围限也开始形成。东喜马拉雅构造结4 Ma以来发生了强烈的隆升和岩石剥露^[25-27];鲜水河断裂以南的断裂围绕东构造结从长期的左行走滑转换为右行走滑^[28-32];大量沉积盆地沿不同性质的断裂分布^[13]。与此同时,藏东南区域水系地貌的演化也开始发生剧变,并逐渐形成现今的地貌格局^[1]。因此东喜马拉雅构造结晚新生代以来持续强烈的构造活动为青藏高原东南缘水系地貌的演化提供了动力来源。

4 结 论

上新世时期芒棒盆地为湖泊相沉积环境,现代龙川江当时并没有出现。现代龙川江在芒棒盆地内同时切割了上新世中晚期和早更新世的火山岩,说明其形成时间不会早于早更新世。腾冲地区早更新世火山岩的K-Ar年龄为0.84~1.4 Ma,说明现代龙川江的出现可能不会早于0.80 Ma。从龙川江的形成时间推测伊洛瓦底江上游水系的形成时间可能也不会早于0.80 Ma。伊洛瓦底江水系的地貌演化与东喜马拉雅构造结的构造演化有密切关系。晚新生代东喜马拉雅构造结对亚洲大陆持续强烈的构造作用导致了青藏高原东南缘一系列构造和水系地貌格局发生剧变。

致谢:感谢孙立蓓研究员、李吾平教授在野外

工作中的全力支持和具体指导,感谢于新兵在野外测量中的热情帮助。

参考文献 (References):

- [1] Brookfield M. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: Rivers draining southwards [J]. *Geomorphology*, 1998, 22(3): 285-312.
- [2] Clark M, Schoenbohm L, Royden L, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 2004, 23, doi:10.1029/2002TC001402.
- [3] 云南省地质局. 1:20万腾冲幅地质图 [M]. 1979. Yunnan Bureau of Geology. Tengchong Geologic Map(1:200000) [M]. 1979(in Chinese).
- [4] 戈宏儒, 李代芸. 云南西部新生代含煤盆地及聚煤规律 [M]. 1999, 云南科技出版社. Ge Hongru, Li Daiyun. Cenozoic Coal-Bearing Basins and Coal-Forming Regularity in West Yunnan [M]. Yunnan: Yunnan Science and Technology Press, 1999(in Chinese with English abstract).
- [5] 李锡康, 谭筱虹, 高子英, 等. 腾冲上新统芒棒组地质时代及沉积环境 [J]. *云南地质*, 2004, 23(2):241-251. Li Xikang, Tan Xiaohong, Gao Ziyang, et al. The geological period and sedimentary environment Mangbang Formation in Tengchong area, Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 2004, 23(2): 241-251 (in Chinese with English abstract).
- [6] 卓维荣, 朱西养. 腾冲-梁河地区的上第三系 [J]. *云南地质*, 1990, 9(4):321-331. Zhuo Weirong, Zhu Xiyang. Neogene system in Tengchong-Lianghe region [J]. *Yunnan Geology*, 1990,9(4):321-331 (in Chinese with English abstract).
- [7] Lin T H, Lo C H, Chung S L, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(5):674-685.
- [8] 季建清, 钟大赉, 张连生. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学及对青藏高原东南部块体运动的意义 [J]. *地质科学*, 2000, 35(3): 336-349. Ji Jianqing, Zhong Dalai, Zhang Liansheng. Kinematics and dating of Cenozoic strike-slip faults in the Tengchong area, west Yunnan: implications for the block movement in the southeastern Tibet Plateau [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(3): 336-349(in Chinese with English abstract).
- [9] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431-437.
- [10] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics [J]. *Nature*, 1976, 264(25): 319-324.
- [11] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with

- plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10(12):611–616.
- [12] 樊春, 王二七. 滇西高黎贡山南段左行剪切构造形迹的发现及其大地构造意义[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(10):1189–1193.
Fan Chun, Wang Erqi. Left–lateral shear deformation found in southern part of the Gaoligong range in west Yunnan and its tectonic implications [J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(4): 337–341.
- [13] Wang E, Burchfiel B. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right–lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis [J]. *International Geology Review*, 1997, 39(3):191–219.
- [14] 李大明, 李齐, 陈文寄. 腾冲火山区上新世以来的火山活动[J]. *岩石学报*, 2000, 16(3): 362–370.
Li Daming, Li Qi, Chen Wenji. Volcanic activities in the Tengchong volcano area since Pliocene [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(3): 362–370(in Chinese with English abstract).
- [15] 穆治国, 佟伟, Curtis G H. 腾冲火山活动的时代和岩浆来源[J]. *地球物理学报*, 1987, 30(3):261–270.
Mu Zhiguo, Tong Wei, Curtis G H. Times of volcanic activity and origin of magma in Tengchong geothermal area, west Yunnan Province[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1987, 30(3): 261–270(in Chinese with English abstract).
- [16] 戴静, 孙柏年, 解三平, 等. 云南腾冲上新统 *Carpinus miofangiana* 的发现及古气候意义[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(9): 1024–1032.
Dai Jing, Sun Bainian, Xie Sanping, et al. *Carpinus miofangiana* from the Pliocene of Tengchong in Yunnan Province and its palaeoclimatic significance[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(9):1024–1032 (in Chinese with English abstract).
- [17] Burbank D W, Anderson R S. *Tectonic Geomorphology*[M]. 2011, John Wiley & Sons.
- [18] Holm R F. Cenozoic paleogeography of the central Mogollon Rim–southern Colorado Plateau region, Arizona, revealed by Tertiary gravel deposits, Oligocene to Pleistocene lava flows, and incised streams [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(11):1467–1485.
- [19] 杨达源, 李郎平, 黄典, 等. 云南高原隆升特点的初步研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 864–871.
Yang Dayuan, Li Langping, Huang Dian, et al. Uplift characteristics of the Yunnan Plateau [J]. *Quaternary Science* 2010, 30: 864–871 (in Chinese with English abstract).
- [20] Kou X Y, Ferguson D, Xu J X, et al. The Reconstruction of Paleovegetation and Paleoclimate in the Late Pliocene of West Yunnan, China [J]. *Climatic Change*, 2006, 77(3/4):431–448.
- [21] Yao Y F, Bruch A A, Cheng Y M, et al. Monsoon versus Uplift in Southwestern China–Late Pliocene Climate in Yuanmou Basin, Yunnan [J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(5): e37760.
- [22] Hall R. *Reconstructing Cenozoic SE Asia* [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1996, 106(1):153–184.
- [23] Hall R. *Australia–SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow*[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2011, 355(1): 75–109.
- [24] Hall R. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean [J]. *Tectonophysics*, 2012, 570–571 (0): 1–41.
- [25] Burg J P, Davy P, Nievergelt P, et al. Exhumation during crustal folding in the Namche–Barwa syntaxis [J]. *Terra Nova*, 1997, 9 (2): 53–56.
- [26] Burg J–P, Nievergelt P, Oberli F, et al. The Namche Barwa syntaxis: evidence for exhumation related to compressional crustal folding [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(2): 239–252.
- [27] Seward D, Burg J–P. Growth of the Namche Barwa Syntaxis and associated evolution of the Tsangpo Gorge: Constraints from structural and thermochronological data[J]. *Tectonophysics*, 2008, 451(1): 282–289.
- [28] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike–slip faults, rifts, and basins during the India–Asia collision: An experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 1988, 93(B12): 15085–15117.
- [29] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1986, 19(1): 113–157.
- [30] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan–Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1/4): 3–84.
- [31] Schärer U, Lian–Sheng Z, Tapponnier P. Duration of strike–slip movements in large shear zones: The Red River belt, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126(4): 379–397.
- [32] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left–lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431–437.