

文章编号: 1006-6616 (2007) 04-0289-08

川西甘孜地区黄土的磁性地层学研究

乔彦松¹, 刘冬雁², 李朝柱¹, 李名则¹, 王 燕¹, 赵志中¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 川西高原位于青藏高原的东南边缘, 气候主要受印度洋季风、高原季风的影响。广泛分布于川西高原的黄土—古土壤序列是高原周缘地区连续的古气候记录类型之一, 记录了上述环流系统的演化过程及其与青藏高原阶段性演化的关系, 对探讨高原隆升的环境响应具有重要意义。对川西甘孜地区甘孜-A 剖面进行了系统的磁性地层学研究。结果表明, BM 界线出现在 L_0 的底部, 并且在剖面下部出现了松山负向期的贾拉米洛正向极性亚带。以古地磁界限点作为时间控制点外推该剖面典型风尘沉积的底界年龄约为 1.16 Ma BP。

关键词: 川西高原; 甘孜地区; 甘孜-A 剖面; 磁性地层学

中图分类号: S155.2⁺4; P318.4

文献标识码: A

国内外的研究结果表明^[1~3], 青藏高原隆升是影响亚洲季风区乃至全球环境变化的一个重要因素。这种影响是通过多种方式实现的^[6~8], 其中, 高原隆升对大气环流的改变是其影响环境的一条重要途径^[8~10]。中国地处全球大气环流若干重要分支的相互作用区, 气候主要受东亚季风 (包括东南夏季风、西北冬季风)、印度洋季风 (西南夏季风)、西风环流及其相互作用的影响^[11]。同时, 高原季风是第四纪期间青藏高原隆升到一定高度形成的独特的环流系统^[12~13], 对中国季风区的环境演化也具有重要作用。由于上述环流系统的影响范围及在各地区的影响程度有显著不同, 所以查明大气环流及其导致的环境变化对高原隆升响应的区域差异是深入理解青藏高原环境效应的重要途径。

黄土堆积与大气环流作用密切相关, 因而是研究过去大气环流演化过程和机理的理想地质材料。在中国北方风尘沉积的研究中, 通过对黄土高原地区第四纪黄土—古土壤序列^[14]、新近纪三趾马红土^[15~19]、中新世黄土—古土壤序列^[20]的系统研究, 对亚洲季风的形成、阶段性演化特征及其驱动机制等方面获得了重要认识。然而, 要深入理解不同大气环流的演化特征及其与青藏高原隆升的关系, 需要对不同地区, 特别是黄土高原以外的风尘堆积序列进行对比研究。青藏高原周缘地区的黄土—古土壤序列^[21~24], 由于与高原的相对位置不同, 且处在不同的大气环流控制之下, 是研究环境演化区域差异和青藏高原隆升的环境效应的理

收稿日期: 2007-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40472088) 和中国地质调查局地质调查项目 (编号: 1212010741403、1212010541401) 资助。

作者简介: 乔彦松 (1966), 男, 副研究员, 主要从事第四纪地质环境、构造地貌等研究工作。E-mail: yansongqiao@sohu.com.

想材料，因而逐渐为国内外学者所关注。其中，川西高原位于青藏高原的东南边缘，气候主要受印度洋季风、高原季风的影响^[25-28]。目前，关于印度洋季风形成、演化的信息主要来源于对海洋沉积的研究^[29-30]，对高原季风行为、机制的探讨也有待深入。广泛分布于川西高原的黄土-古土壤序列主要是早更新世晚期以来形成的^[21, 25-28, 31]，它是高原周缘地区连续的古气候记录类型之一，记录了该时期上述环流系统的演化过程及其与青藏高原阶段性演化的关系，对探讨高原隆升的环境响应具有重要意义，并可为研究印度洋季风、高原季风的演化过程与机制提供重要的证据。

国内学者曾对川西高原甘孜地区的黄土进行了深入的研究，并在地层时代^[21, 25-28, 31]、成因^[26, 32-33]及古环境解释^[25-28, 31, 34]等方面取得了重要进展，为今后的研究奠定了很好的基础。然而，在古环境变迁的研究过程中，只有通过多个剖面的对比分析才能获得更加可靠的信息，而时间标尺的确立又是古环境演化分析的基础。为此，笔者对甘孜地区黄土保存比较完整的甘孜-A剖面(图1)进行了系统的磁性地层学研究，为今后进一步开展古环境演化过程的对比分析奠定基础。

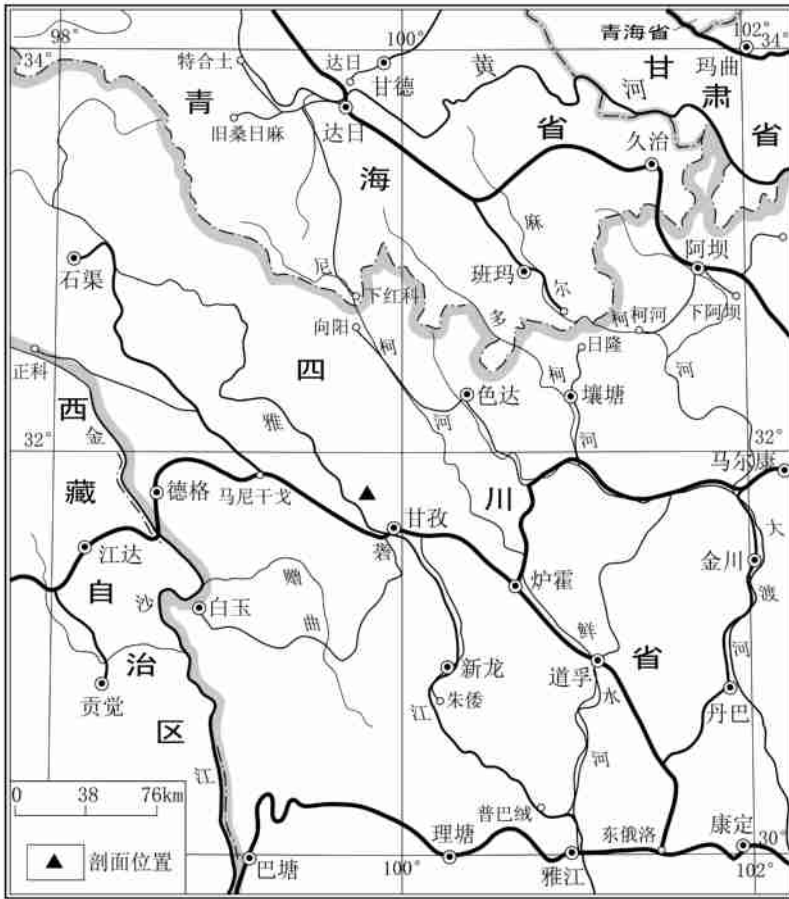


图1 剖面位置图

Fig 1 Map showing the position of the Gazê-A section

1 剖面描述、样品采集和实验方法

川西甘孜地区地处针叶林温暖亚湿润带，年平均气温 5.6°C ，年平均降水量 636 mm ，降水主要集中在夏季，占全年总降水量的 81% 。甘孜-A 剖面 ($31^{\circ}37'22.8''\text{N}$ 、 $99^{\circ}58'29.4''\text{E}$) 位于甘孜县城西北约 2 km 处，剖面所处地貌部位属于雅砻江的五级阶地，海拔 3483 m 。剖面总厚度为 32.5 m ，底部与基岩呈不整合接触。根据地层的岩性、结构、颜色、接触关系等特征自上而下可以分为 36 层 (图 2)。自上而下地层分层的特征描述如下。

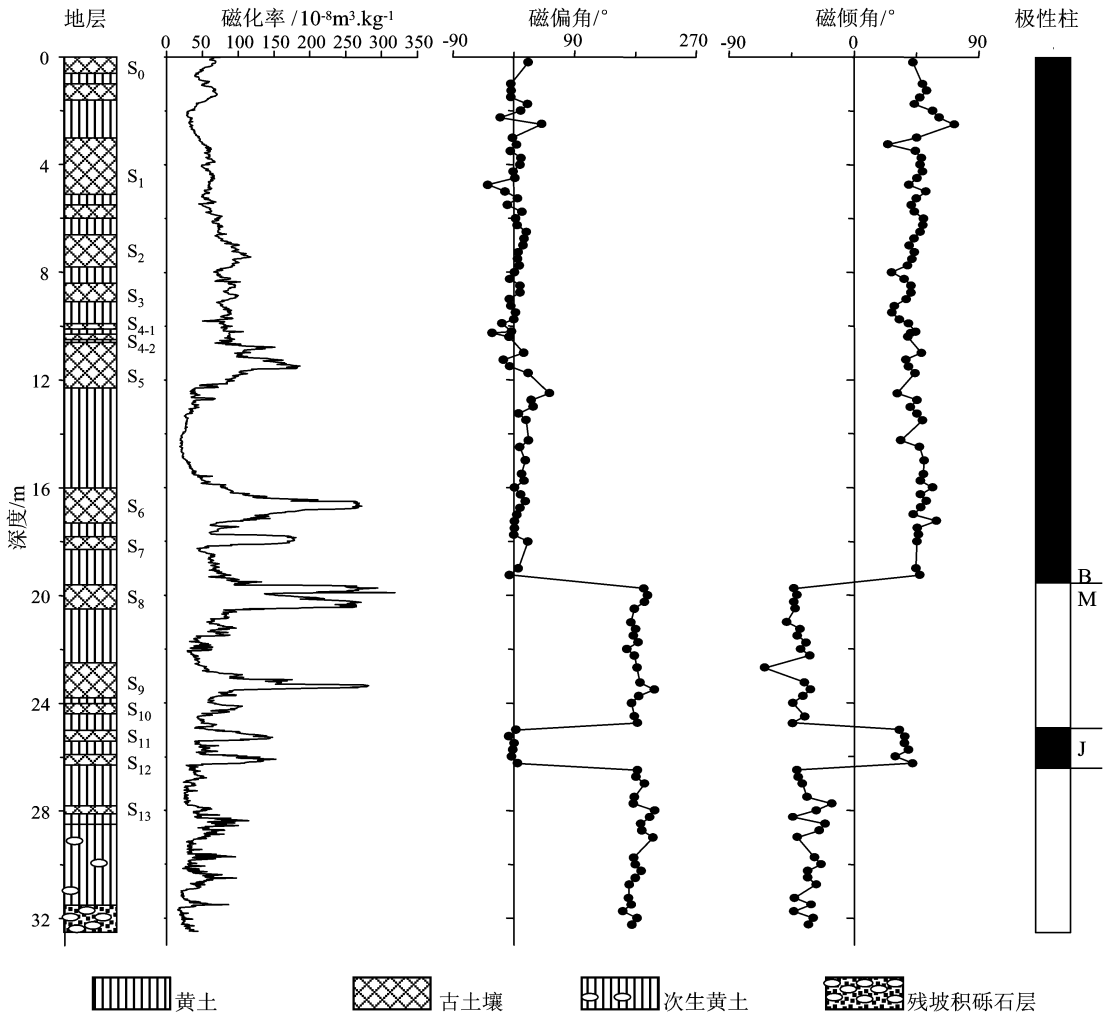


图 2 甘孜-A 剖面岩性地层及磁性地层

Fig 2 Lithostratigraphy and magnetostratigraphy of the Garzê-A section

1. 浅灰黑色粉细砂层，结构疏松，含大量植物根系及生物孔洞。含少量钙结核，结核直径一般为 $0.1 \sim 0.5\text{ cm}$ 厚度 0.6 m
2. 灰黄色粉细砂层 厚度 0.4 m
3. 浅棕红色粉细砂层 厚度 0.6 m

- | | |
|---------------------------------------|----------|
| 4. 浅棕黄色粉细砂层。含少量钙质薄膜 | 厚度 1.4 m |
| 5. 棕红色粉细砂层。结构松散, 含大量白色钙质薄膜 | 厚度 2.1 m |
| 6. 浅棕黄色粉细砂层。含白色钙质薄膜及少量钙结核 | 厚度 0.4 m |
| 7. 浅棕红色粉细砂层 | 厚度 0.5 m |
| 8. 浅棕黄色粉细砂层 | 厚度 0.6 m |
| 9. 棕红色粉细砂层 | 厚度 1.2 m |
| 10. 灰黄色粉细砂层。质地均一, 结构致密, 钙质胶结, 含少量钙质结核 | 厚度 0.6 m |
| 11. 浅棕红色粉细砂层 | 厚度 0.7 m |
| 12. 浅灰黄色粉细砂层 | 厚度 0.8 m |
| 13. 棕红色含砂粘土层 | 厚度 0.2 m |
| 14. 棕黄色粉细砂层, 含大量钙质结核, 结核直径一般为 1~5cm | 厚度 0.2 m |
| 15. 棕红色含粘土粉细砂层 | 厚度 0.2 m |
| 16. 灰黄色粉细砂层。含大量钙质结核 | 厚度 0.1 m |
| 17. 棕红色含粘土细砂层。含大量钙结核及钙质薄膜 | 厚度 1.7 m |
| 18. 灰黄色粉细砂层 | 厚度 3.7 m |
| 19. 棕红色含粘土粉细砂层 | 厚度 1.3 m |
| 20. 灰黄色粉细砂层, 含大量钙结核 | 厚度 0.5 m |
| 21. 棕红色含粘土粉细砂层, 含少量钙质薄膜 | 厚度 0.5 m |
| 22. 灰黄色粉细砂层 | 厚度 1.3 m |
| 23. 棕红色含粘土粉细砂层 | 厚度 0.9 m |
| 24. 棕黄色粉细砂层 | 厚度 2.0 m |
| 25. 浅棕红色粉细砂层 | 厚度 1.3 m |
| 26. 棕黄色粉细砂层。含大量钙结核 | 厚度 0.2 m |
| 27. 棕红色粉细砂层。含大量钙质薄膜 | 厚度 0.4 m |
| 28. 棕黄色粉细砂层 | 厚度 0.6 m |
| 29. 棕红色粉细砂层。含大量钙质薄膜 | 厚度 0.4 m |
| 30. 棕黄色粉细砂层 | 厚度 0.5 m |
| 31. 棕红色粉细砂层, 含大量钙质薄膜 | 厚度 0.4 m |
| 32. 棕黄色粉细砂层 | 厚度 1.5 m |
| 33. 棕红色粉细砂层 | 厚度 0.3 m |
| 34. 灰黄色粉细砂层 | 厚度 0.4 m |
| 35. 灰黄色含粘土粉细砂层。含少量小砾石 | 厚度 3.0 m |
| 36. 灰黄色粉细砂层。含大量砾石, 砾石磨圆度很差 | 厚度 1.0 m |

野外按照 20~40 cm 的间距采集用于古地磁测试的定向样品 108 块, 按照 2 cm 的间距采集用于磁化率测试的样品 1626 个。

古地磁测试在中国地质科学院地质力学研究所古地磁实验室完成。对剖面的共 108 块定向古地磁样品用美国 ASC 公司生产的 TD-48 型全自动热退磁仪进行热退磁, 剩磁测量在美国产 2G-755 型超导磁力仪上完成, 实验过程均在零磁空间进行。首先测量样品的天然剩磁, 然后对所有的样品进行了系统热退磁, 退磁温度为 100℃、150℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃、450℃、500℃、520℃、550℃、585℃、600℃、620℃、675℃, 共 15 步。磁

化率测量在英国产 Bartington MS2 磁化率仪上完成，磁化率测试结果与野外地层划分具有很好的对应关系，即磁化率曲线的峰、谷分别对应于野外划分的古土壤和黄土层（图 2）。

2 磁性地层研究结果

在表明退磁结果的剩磁矢量正交投影图（图 3）上，所有样品的剩磁都有两个分量，且大多数样品的剩磁第一分量在 200~250℃ 可被完全清洗，此分量为次生粘滞剩磁分量，与现代地磁场方向基本一致；剩磁第二分量在 250℃ 以后保持稳定，在剩磁矢量正交投影图上趋于原点，代表了原生特征剩磁的矢量方向。

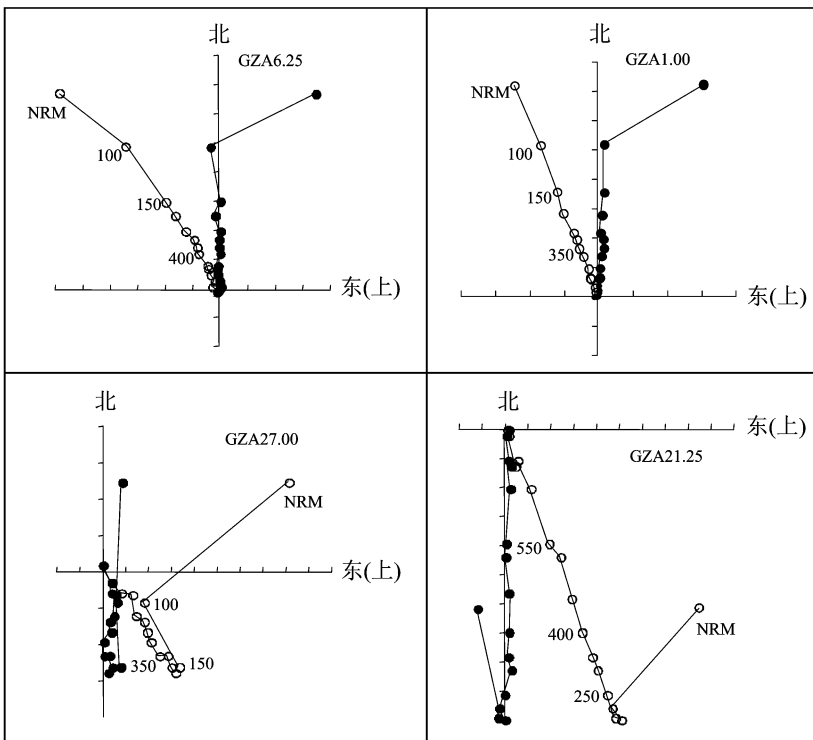


图 3 甘孜-A 剖面典型样品热退磁的剩磁矢量正交投影图

Fig 3 Orthogonal projection of vectors of remanent magnetism of thermal demagnetization of typical normal and reversed polarity samples from the Garzê-A section.

● 为水平分量；○ 为垂直分量

甘孜-A 剖面的磁性地层研究结果如图 2 所示。从图中可以看出，B/M 界线出现在 L₇ 的底部，并且在剖面下部 24.9~26.4 m 的位置出现了松山负向期的贾拉米洛正向极性亚带。笔者以 B/M 界线（0.78 Ma BP）及贾拉米洛正极性亚时的两个界线点年龄（0.99 和 1.07 Ma BP）3 个绝对年龄值作剖面的深度-年龄关系图（图 4），可以看出该剖面的深度与年龄具有很好的相关性，相关系数可达 0.9961。

从地层的沉积特征（图 2）可以看出，甘孜-A 剖面的 1~34 层为典型的风尘沉积，第 35 层为经过水流改造的次生黄土，第 36 层为残坡积物。以 B/M 界线（0.78 Ma BP）和贾拉米洛正极性亚时的底界年龄（1.07 Ma BP）计算出该时期的风尘沉积速率为 2.38 cm/ka，以此

沉积速率外推剖面典型风尘沉积的底界（深度 28.5 m）的年龄约为 1.16 Ma BP。该结果与笔者以前做的位于雅砻江六级阶地的甘孜寺剖面^[35]、陈诗越等^[28]在甘孜地区所做的甘孜剖面的底界年龄基本一致。

3 结论及问题展望

对甘孜-A 剖面系统的磁性地层学研究结果表明，BM 界线出现在 L₇ 的底部，并且在剖面下部出现了松山负向期的贾拉米洛正向极性亚带。以古地磁界线点作为时间控制点外推该剖面典型风尘沉积的底界年龄约为 1.16 Ma BP。通过对该剖面多个指标的进一步测试分析，有望在以下几个方面取得重要进展：

（1）该区风尘物源及其反映的更新世中期以来的大气环流格局演化以及物源区干旱化发展等环境状况的变化。（2）探讨更新世中期以来全球性重大环境事件在青藏高原东部地区的反映。同时，有望对高原季风、印度洋季风的演化过程获得重要信息。（3）在上述研究的基础上，建立该区更新世中期以来一系列重要环境事件的时间序列，并通过与全球/区域性重大地质环境事件的对比，对该区环境变化的机制取得新的认识。

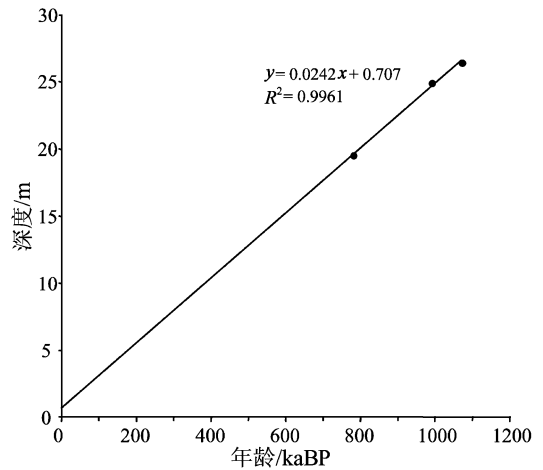


图 4 甘孜-A 剖面的深度-年龄图

Fig 4 Age vs. depth diagram of the Garzê-A section

参 考 文 献

- [1] Raymo ME, Ruddiman WF, Froelich PN. The influence of late Cenozoic mountain building on oceanic geochemical cycle [J]. *Geology*, 1988, 16 (7): 649~653.
- [2] Ruddiman WF, Kutzbach JE. Forcing of the late Cenozoic Northern Hemisphere climate by plateau uplift in Southern Asia and the American West [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94 (D15): 18409~18427.
- [3] Broccoli AJ, Manabe S. The effects of orography on mid-latitude Northern Hemisphere dry climate [J]. *Journal of Climate*, 1992, 5: 1181~1201.
- [4] Kutzbach JE, Prell WL, Ruddiman WF. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101: 177~190.
- [5] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19 (1): 1~10.
- [6] Flower BP, Kennett JP. Middle Miocene ocean-climate transition: high-resolution oxygen and carbon isotopic records from Deep Sea Drilling project site 588A, southwest Pacific [J]. *Paleoceanography*, 1993, 8 (6): 811~843.
- [7] Ruddiman WF. Tectonic uplift and climate change [M]. New York: Plenum Press, 1997, 1~233.
- [8] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性 [J]. *第四纪研究*, 1998, 3: 194~203.
- [9] Manabe S, Terpstra TB. The effects of mountain on the general circulation of atmosphere as identified by numerical experiment [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1974, 31 (1): 3~42.
- [10] Molnar P, England B, Martini J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau and the Indian Monsoon development [J]. *Review of Geophysics*, 1993, 34: 357~396.
- [11] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1~262.
- [12] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1~13.

- [13] 中国科学院青藏高原综合考察队. 西藏气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1984. 1~300.
- [14] 刘东生, 等. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [15] Sun DH, Shaw J, An ZS, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7. 2 Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25 (1): 85~88.
- [16] Ding ZL, Yu ZW, Yang SL, et al. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7. 0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 152: 49~66.
- [17] Guo ZT, Peng SZ, Hao QZ, et al. Origin of the Miocene-Pliocene red-earth formation at Xifeng in Northern China and implications for paleoenvironments [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 170: 11~26.
- [18] An ZS, Kutzbach JE, Prell SC, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411: 62~66.
- [19] Qiang XK, Li ZX, Powell C, et al. Magnetostratigraphic record of the Late Miocene onset of the East Asian monsoon, and Pliocene uplift of northern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 187: 83~93.
- [20] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416: 159~163.
- [21] 陈富斌, 高生怀, 陈继良, 等. 甘孜黄土剖面磁性地层初步研究 [J]. *科学通报*, 1990, 35 (20): 1600.
- [22] 方小敏, 吕连清, 杨胜利, 等. 昆仑山黄土与中国西部沙漠发育和高原隆升 [J]. *中国科学*, 2001, 31 (3): 177~184.
- [23] Wu GJ, Pan BT, Li JJ, et al. Tectonic-climatic events in eastern Qilian Mountain over the past 0. 83 Ma [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44 (Supp.): 251~260.
- [24] Fang XM, Li JJ, Rob Van der Voo. Rock Magnetic and grain size evidence for intensified Asian atmospheric circulation since 800, 000 years B. P. related to Tibetan uplift [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 165: 129~144.
- [25] 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 川西高原甘孜黄土地层学 [M]. *地球学报*, 1997, 18 (4): 413~420.
- [26] 潘宝田, 王建民. 末次间冰期以来青藏高原东部季风演化的黄土沉积记录 [M]. *第四纪研究*, 1999, 4: 330~335.
- [27] Yan DM, Fang XM, Chen SY, et al. Pleistocene magnetic susceptibility and paleomagnetism of the Tibetan loess and its implication on large climatic change events [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44 (Supp.): 227~232.
- [28] 陈诗越, 方小敏, 王苏民. 川西高原甘孜黄土与印度季风演化关系 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22 (3): 41~45.
- [29] Croon D, Steens TNF, Troelstra SR. Onset of monsoonal related upwelling in the western Arabian sea [M]. *Proc. ODP Sci. Res.*, 1991, 117: 257~263.
- [30] Prell WL, Kutzbach JE. Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution [J]. *Nature*, 1992, 360: 647~652.
- [31] 方小敏, 陈富斌, 施雅风, 等. 甘孜黄土与青藏高原冰冻圈演化 [J]. *科学通报*, 1996, 41 (20): 1865~1867.
- [32] Fang XM. The origin and provenance of Malan loess along eastern margin of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its adjacent area [J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 38: 876~887.
- [33] 王运生, 李永昭, 向芳. 川西高原甘孜黄土的成因 [J]. *地质力学学报*, 2003, 9 (1): 92~96.
- [34] 吴海斌, 郭正堂, 方小敏, 等. 250ka BP 前后中国北方干旱区的扩张及原因 [J]. *科学通报*, 2002, 47 (17): 1341~1346.
- [35] 乔彦松, 赵志中, 王燕, 等. 川西甘孜黄土磁性地层学及其古气候意义 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (2): 250~256.

MAGNETOSTRATIGRAPHY OF A LOESS-SOIL SEQUENCE IN THE GARZE AREA, WESTERN SICHUAN

QIAO Yan-song¹, LIU Dong-yan², LI Chao-zhu¹, LI Ming-ze¹, WANG Yan¹, ZHAO Zhi-zhong¹

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China*)

Abstract: The western Sichuan Plateau is located on the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, and its climate is mainly controlled by the Indian monsoon and Plateau monsoon. The loess-paleosol sequence distributed widely on the western Sichuan Plateau is among the best continuous records of the Quaternary climate and environment on the margins of the plateau. It records the evolutionary process of the above-mentioned circulation system and its relation to the phased evolution of the Qinghai-Tibet Plateau and is crucial for understanding the regional environmental response to the uplift of the plateau. A systematic magnetostratigraphic study was conducted on the Garzê-A section in the Garzê area, western Sichuan. The results indicate that the B/M boundary appears at the top of L₇ and that the Jaramillo normal polarity subzone of the Matuyama negative polarity zone appears in the lower part of the section. Extrapolation from the paleomagnetic boundary point yields a basal age of ~1.16 Ma for typical eolian deposits of the Garzê-A section.

Key words: western Sichuan Plateau; Garzê; Garzê-A section; magnetostratigraphy