第 24 卷第 2 期
2018 年 4 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 24 No. 2
Apr. 2018

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2018.24.02.029

文章编号：1006-6616（2018）02-0274-09

中原邙山黄土地层划分的讨论

杨 州[1]，王书兵[2]，蒋复初[2]，王喜生[2]，傅建利[2]

（1. 河南省信阳水文水资源勘测局，河南 信阳 464000；
2. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081）

摘 要：地层时代和地层划分研究一直是基础性、先导性工作，随着科学研究的深入和材料的丰富，地层划分不断被重新认识。黄土地层时代和划分主要依靠 OSL、^{14}C、古地磁和磁化率的对比。中原邙山因发育巨厚的马兰黄土而闻名中外，但地层划分却出现了不同的认识。早期对赵下峪剖面的研究认为 L_1 层厚 98 m，并发育 L_1SS_1 弱古土壤层；剖面底部出露最老地层为 S_{10} 层。后来的观点把早期的 L_1 层划分为 L_1、S_1、L_2 层，剖面底部出露最老地层为 S_{11} 层。通过对 B/M 界线进行详细的古地磁研究，剖面上部补充年代测试样品，结合已有测年结果，分析认为早期对 L_1 的划分和对剖面最老地层的确认是正确的，但 B/M 界线位置划分有误；而后期的研究对 B/M 界线位置的划分是正确的，但把底部最老地层划分为 S_{11} 是不当的，同时把马兰黄土中弱古土壤层 L_1SS_1 划分为 S_1 也是不合适的。地层对比表明，邙山黄土发育了 S_0—S_{10} 黄土—古土壤序列，B/M 界线位于 L_8 下部。

关键词：马兰黄土；B/M 界线；地层划分；邙山

中图分类号：P534.63　　　　**文献标识码**：A

DISCUSSION ON MANGSHAN LOESS STRATIGRAPHIC DIVISON IN CHINA CENTRAL PLAINS

YANG Zhou[1], WANG Shubing[2], JIANG Fuchu[2], WANG Xisheng[2], FU Jianli[2]

(1. *Henan Xinyang Hydrology and Water Resources Survey Bureau*, *Xinyang* 464000, *Henan*, *China*;
2. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Stratigraphic age and stratigraphic division are basic and pilot work. As the research moves along, stratigraphic division will be re-recognized. The age and division of the loess stratigraphy mainly depend on OSL, ^{14}C, paleomagnetism and magnetic susceptibility. Mangshan is famous for the extremely thick Manlan loess, while there exists different understandings about the stratigraphic division. Early research about Zhaoxiayu section revealed that the thickness of L_1 is 98m, with the weakly developed palaeosol L_1SS_1, and the oldest stratum exposed at the bottom of the section is the palaeosol S_{10}. Later, the early L1 layer was divided into L1, S1 and L2 layers, and the oldest layer at the bottom of the section is the palaeosol S11 layer. Based on detailed paleomagnetic study of B/M boundary, combined with previous dating results, it is believed that the early division of L1 and the confirmation of the oldest stratum are correct, but the position of B/M boundary is mislocated. The late-stage studies are right in the position of B/M boundary but wrong in the confirmation of the oldest stratum, and also it's not

基金项目：国家自然科学基金项目（40302025，40972223，41272393，41472327）；中国地质科学院重点开放实验室专项资金资助项目（KL05-13）；中国地质大调查工作项目（1212010711705）

作者简介：杨州（1964-），男，高级工程师，从事水文地质分析评价等工作。E-mail：yangz656@126.com

通讯作者：王书兵（1972-），男，副研究员，从事第四纪地质与环境研究工作。E-mail：wsbln@126.com

收稿日期：2017-10-25；**修回日期**：2017-12-25　　　**范二平编辑**

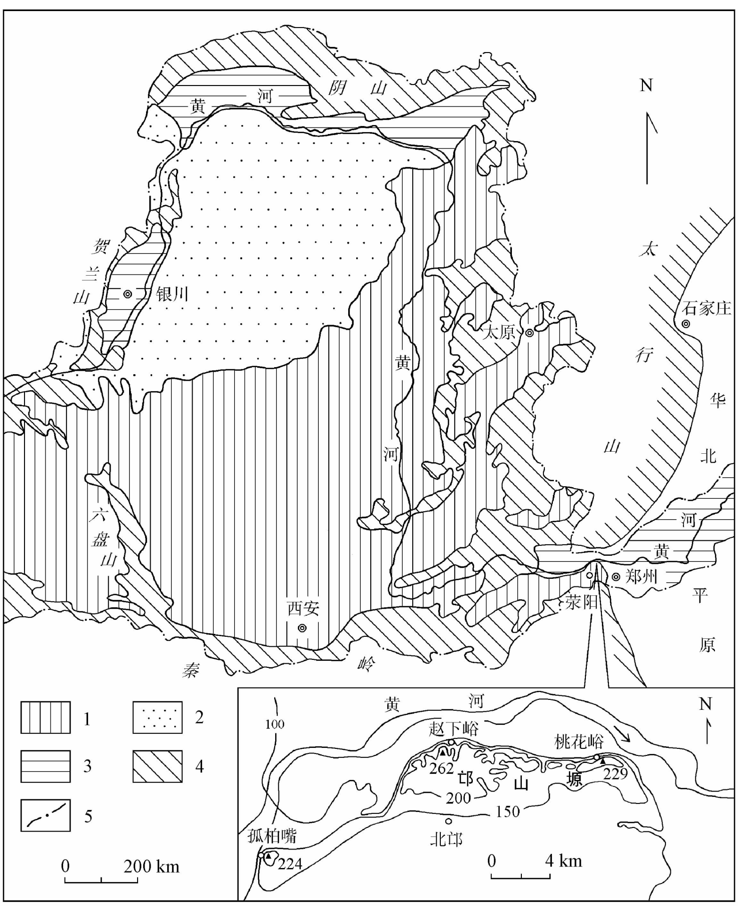
appropriate to divide the palaeosol layer L_1SS_1 of the Malan Loess into S_1. The stratigraphic correlation shows that the Mangshan loess include S_0-S_{10} loess-palaeosol sequence, and the B/M boundary is located at the bottom of the loess L_8.

Key words: Malan loess; B/M boundary; stratigraphic division; Mangshan

中原邙山以发育巨厚的马兰黄土而闻名中外[1~6]。邙山黄土研究剖面从东部的桃花峪[1]直到西部的孤柏嘴[2]，其中以中部赵下峪剖面研究成果丰硕，取得了长足的进展[7~14]。但目前地层划分上还存在分歧，主要表现在对 S_2 以上地层的划分，以及 B/M 界线在地层中的位置[15~17]。出现这些分歧后，在地层间对比、沉积速率计算、气候变化记录等研究方面也随之出现较大的差异[7~17]。之所以出现地层划分的不同认识，是由于年代学测试结果和 B/M 界线位置的鉴定不同。地层时代和地层划分研究一直是基础性、先导性工作，随着研究的深入和材料的丰富，地层划分不断被重新认识。鉴于这些问题，文中对邙山上部补充了年代学测试结果，并对 B/M 界线位置进行详细的厘定[18]，在此基础上，结合已有研究成果，对邙山黄土地层的划分进行了重新认识。

1　B/M 界线位置及下部地层划分

野外详细研究了郑州邙山黄土塬（见图 1）赵下峪剖面及其西侧不远（约 1 km）处的官庄峪剖面，重点瞄准 B/M 转换界线。官庄峪剖面出露较好，对深度 128.0 ~ 135.0 m 间发育 L_7、S_7、L_8 和 S_8 地层单元进行了详细古磁性测试，结果表明，在 L_8 的下部，极性转换开始于 132.04 m，结束于 132.86 m，极性转换带厚度达到 82 cm。以全部倒

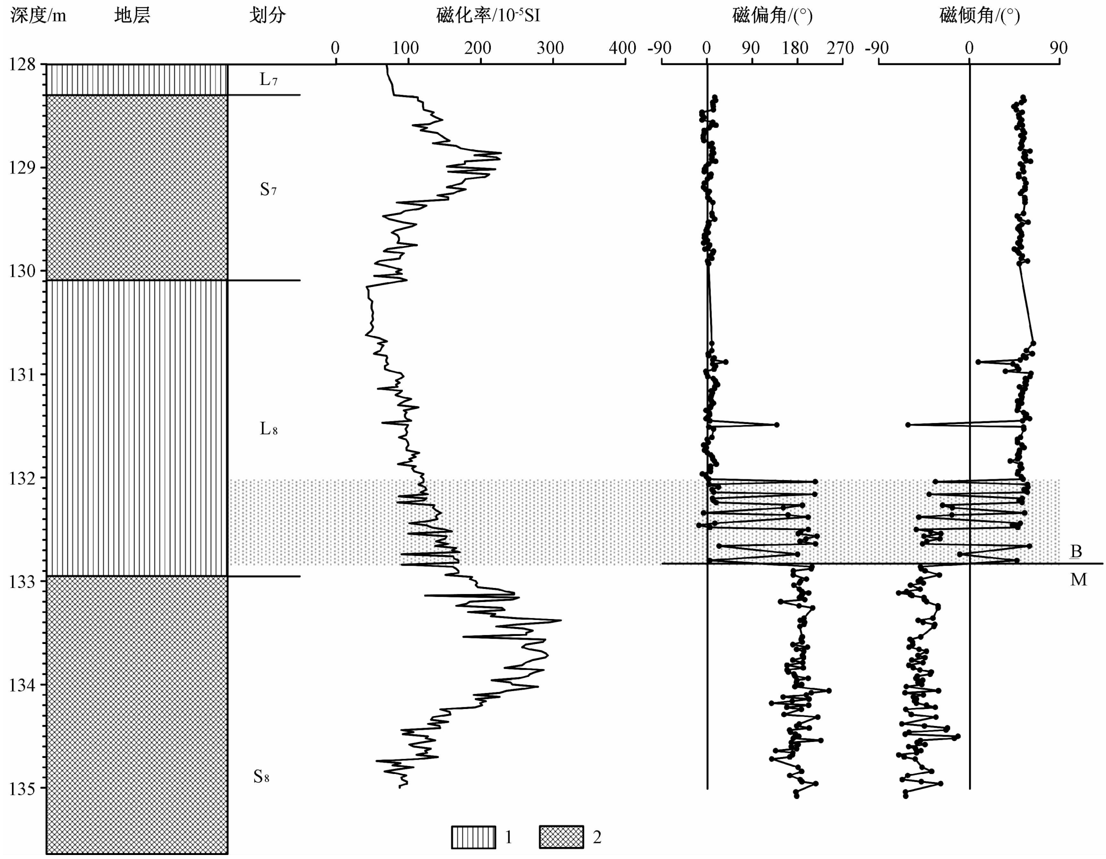


1—黄土；2—沙漠；3—冲积层；4—基岩；5—黄河流域边界

图 1　河南邙山黄土地层位置[3]

Fig. 1　Location of the loess strata in Mangshan, Henan province

转为标志，则 B/M 界线置于深度 132.04 m 处，位于 L_8 的下部（见图2）。这个结果与 Jin 等[14]的研究结果相一致。近年的研究也表明，在黄土高原内部的洛川[19]、灵台和赵家川[20]、宝鸡和西峰[21]以及黄土高原东西缘的九州台[22]和南缘的三门峡[23]等经典剖面中 MBB 界线也存在倒转的过程。在宝鸡黄土剖面中，MBB 转换位于 L8 下部[21]。对比早期对邙山赵下峪剖面古地磁研究结果（见图3），Zheng 等[15]、季军良等[16]的研究结果中也是存在 MBB 转换过程的，但其正式倒转位置应在 147.0 m 而不是 148.1 m 处，147.0～148.1 m 间是极性转换过程；蒋复初等[3]研究认为的 B/M 界线应从 159.8 m 处上移到 149.2 m 处，其下的 149.2～150.9 m 间是极性转换过程。

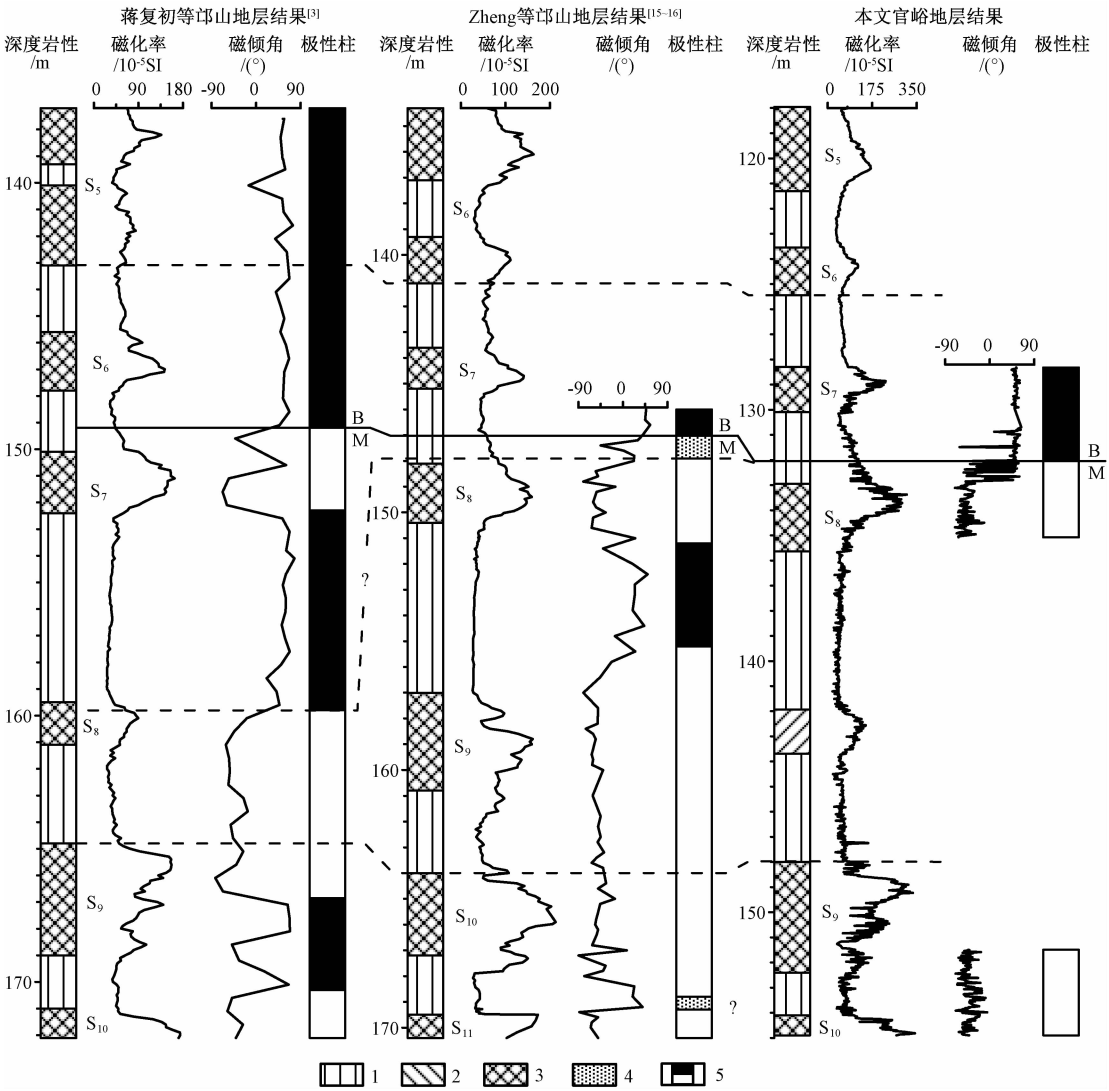


1—黄土；2—古土壤

图 2 中原邙山黄土剖面 MBB 界线位置

Fig. 2 Location of the MBB boundary of the loess section in Mangshan, China Central Plains

经过对比可以看到，已有研究和现研究结果的下部磁化率曲线非常一致（见图3）。以 B/M 界线为标准，蒋复初等[3]地层划分中的 S_5 层对应于官庄峪剖面的 S_5、L_6、S_6；L_6 层对应于官庄峪剖面的 L_7 层；S_6 层对应于官庄峪剖面 S_7 层；L_7 层对应于官庄峪剖面的 L_8 层；S_7 层对应于官庄峪剖面 S_8 层；L_8、S_8、L_9 层与官庄峪剖面的 L_9 层对应，研究认为蒋复初等[3]划分的 S_8 层实际是 L_9 层中的弱古土壤层；S_9、L_{10}、S_{10}层分别对应于官庄峪剖面 S_9、L_{10}、S_{10}层。Zheng 等[15~16]研究中的 S_6 层应对应于官庄峪剖面的 S_5、L_6 和 S_6 层；S_7、L_8 和 S_8 层对应于官庄峪剖面的 S_7、L_8 和 S_8 层；L_9、S_9、L_{10} 层对应于官庄峪剖面的 L_9 层，实际上 Zheng 等[15~16]也把 L_9 层中的弱古土壤层单独划成了 S_9 层；S_{10}、L_{11}、S_{11} 层分别对应于官庄峪剖面的 S_9、L_{10}、S_{10} 层（见图3）。由此推断，在上粉砂层 L_9 层段存在的正极性段可能是重磁化的结果[24~25]，而不是 BMPC 事件[15~16]或者 Kamikatsura、Santa Rosa 事件[26~28]。官庄峪剖面从 S_9 层下部开始的详细磁性地层测量显示均为负极性，而黄土高原的 Jaramillo 正极性亚时顶界一般出现于 L_{10} 层下部或 S_{10} 层上部[28~29]，因此，邙山黄土下部出露的最老地层为 S_{10} 层，未进入 Jaramillo 正极性亚时。而蒋复初等[3]文中提及 S_9 层上部出现的正极性事件，尚需进一步确认。



1—黄土；2—弱发育古土壤；3—古土壤；4—不确定极性；5—正向/反向极性

图 3　河南邙山黄土 S5 以下地层剖面对比

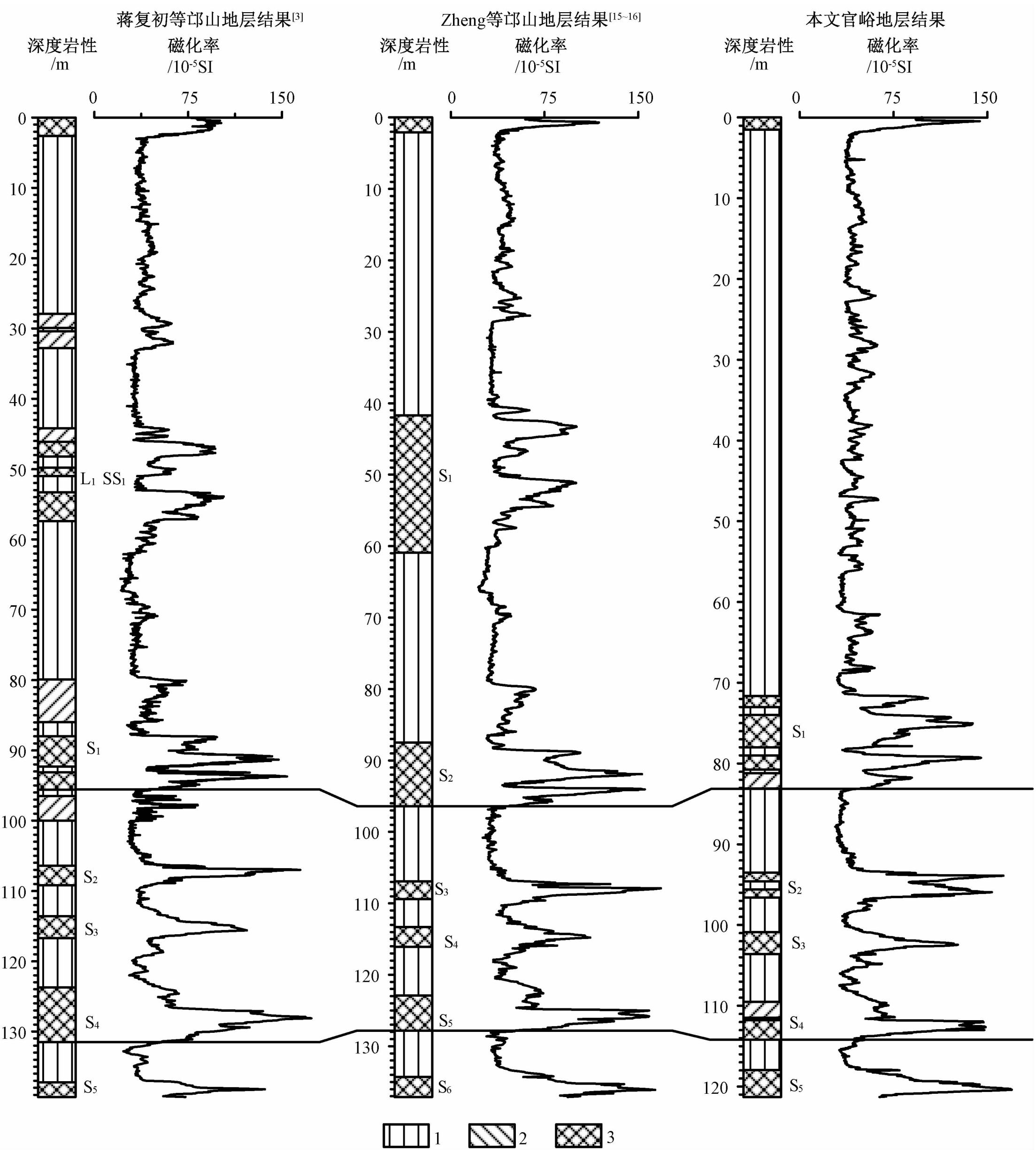
Fig. 3　Comparison of stratigraphic setions under the loess S5 in Mangshan, Henan province

2　上部黄土地层序列划分

根据上面对下部地层划分和讨论，并以此为基础将上部的地层加以对比（见图 4），官庄峪剖面的 S_1 层和蒋复初等文中[3]划分的 S_1 层、Zheng 等[15~16]划分的 S_2 层具有一致的磁化率曲线，因此，应将 Zheng 等[15~16]文中的 S_2 层划分为 S_1 层较为合适，并与桃花峪剖面[1]、孤柏嘴剖面[2]中 S_1 古土壤层出现的深度相一致。以此为标志的 L_2—S_5 地层，三者具有高度一致的磁化率曲线，分析认为蒋复初等[3]划分的 S_5 层应分解为 S_5、L_6、S_6 三层，而 Zheng 等[15~16]文中的 S_2—S_6 地层应划分为 S_1—S_5 层，这样上、下地层划分就比较合理，而且与官庄峪剖面进行较好的对比。在官庄峪剖面中，古土壤 S_1 层野外特征显著极易分辨，整体厚度较大，包含 3 层古土壤层；古土壤 S_2 明显由两层古土壤组成，这与黄土高原内部相一致；同时，古土壤 S_5 层也呈现上部层位的最高值[29~30]，说明这样的地层划分是比较合适的，特别是 S_1 层和 S_2 层磁化率曲线，具有更多的细节。

3　马兰黄土 L_1 地层划分的讨论

近年来，释光测年取得长足进展[31~34]。对中国黄土的释光年代，从 300 ka[35]到 600 ka 年代[36~37]甚至 B/M 界线附近的年龄[38~39]测试结果



1—黄土；2—弱发育古土壤；3—古土壤

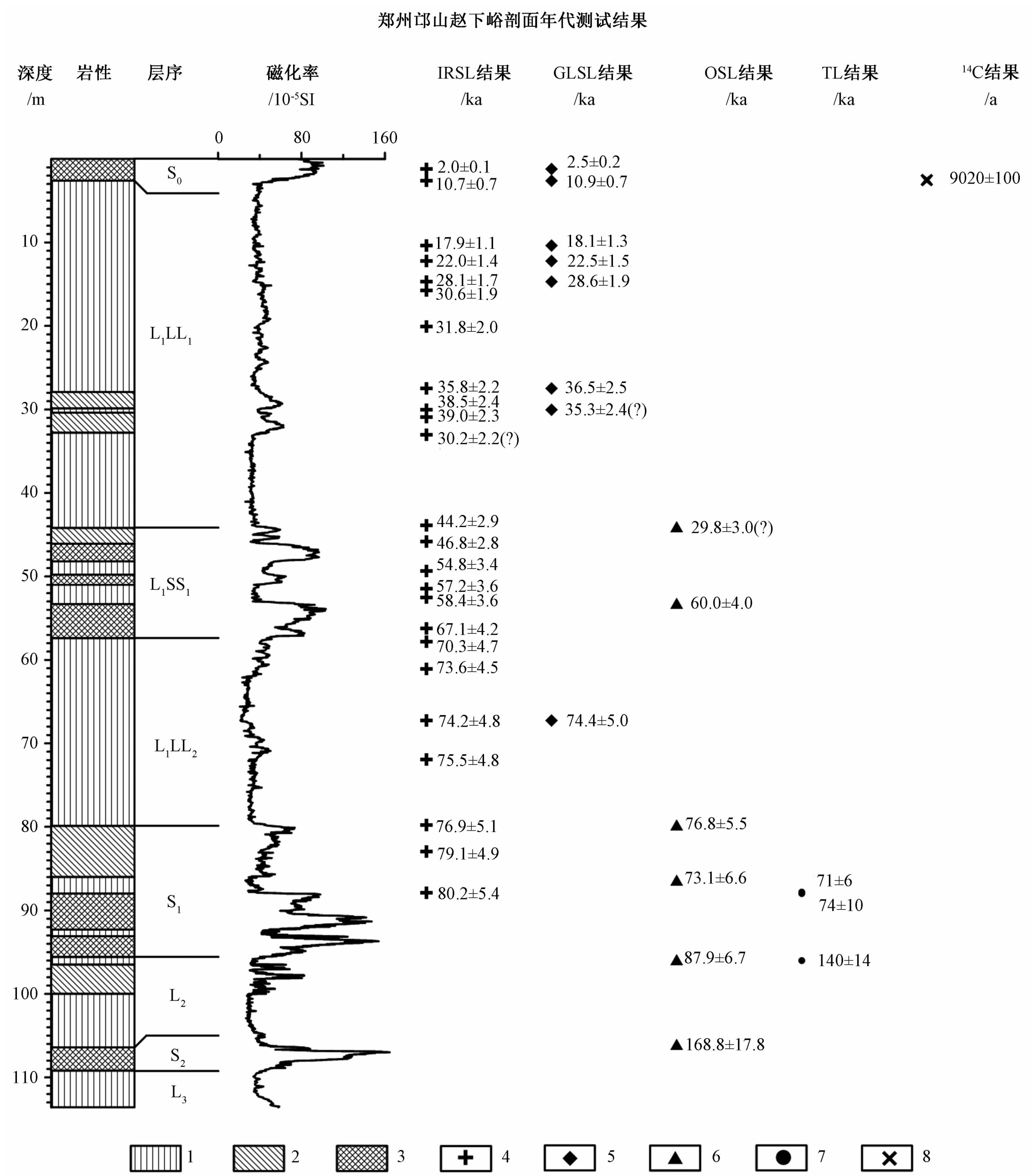
图 4 河南邙山黄土 S_5 以上地层剖面对比

Fig. 4 Comparison of stratigraphic sections above the loess S_5 in Mangshan, Henan province

也越来越被认可，特别是末次间冰期以来的黄土释光测年，是解决 150 ka 以来黄土精细年龄的可靠方法之一[40~45]。现研究在剖面 S_0 层底部测得 ^{14}C 年龄结果为 9020±100 a，与赵华等[46]释光结果相一致，并控制了全新世黄土的底界。同时将赵华[46]、蒋复初等[3]对赵下峪剖面详细的释光年代学研究结果综合绘于图 5，结果显示，蒋复初等[3]对剖面 S_2 层以来的地层划分是正确的，与年龄结果能较好的对应起来，地层深度 44~58 m 间的弱古土壤是 L_1SS_1 而不是古土壤 S_1 层。最近 Qiu 等[17]对赵下峪剖面 S_4 层以来的地层也开展了详细的释光研究，从其顶部 2 个测年结果看（2.2 m 处 16.5±1.1 ka、2.5 m 处 15.5±1.2 ka），明显比现 ^{14}C 测试结果和已有释光测年结果偏老，具体原因尚需进一步研究解决。

4 结论与讨论

通过对中原邙山黄土剖面 MBB 界线详细古地磁测量表明 B/M 界线置于深度 132.04 m 处，位于



1—黄土；2—弱发育古土壤；3—古土壤；4—IRSL 结果；5—GLSL 结果；6—光释光结果；7—热释光结果；8—^{14}C 结果

图 5　邙山赵下峪剖面年代学测试结果（注：IRSL 和 GLSL 引自[46]，OSL 和 TL 引自[3]）

Fig. 5　Chronological results of the Zhaoxiayu section of the Mangshan loess

L_8 的下部，极性转换带厚度达到 82 cm。研究认为早期蒋复初等[3]文中 B/M 界线应从 159.8 m 处上移到 149.2 m 处，其下的 149.2 ~ 150.9 m 间是极性转换过程；后期 Zheng 等[15~16]文中 B/M 界线位置从 148.1 m 处调整到 147.0 m 比较合适，147 ~ 148.1 m 间是极性转换过程。以 B/M 界线为标准，蒋复初等[3]划分的原 S_5 层拆解成 S_5、L_6、S_6 层，原 L_6— S_7 层分别调整为 L_7—S_8 层，原 L_8、S_8、L_9 层合并为 L_9 层，其余层位不做变动；Zheng 等[15~16]文中的原 S_6 层拆解成 S_5、L_6 和 S_6 层，原 L_9、S_9、L_{10}层合并为 L_9 层，原 S_{10}—S_{11} 层分别调整为 S_9—S_{10}层，原 S_2—S_5 层分别调整为 S_1—S_4 层，原 L_1、S_1、L_2 层合并为 L_1 层（其中原 S_1 层调整为 L_1SS_1 层）。在 L_9 层段存在的正极性段，可能是重磁化的结果，而不是 BMPC 事件或者 Kamikatsura、Santa Rosa 事件。研究认为邙山黄土下部出露的最老地层为 S_{10}层，未进入 Jaramillo 正极性亚时。

尽管赵下峪西侧不远的官庄峪剖面中马兰黄

土未出现弱发育古土壤层 L_1SS_1，但若把赵下峪剖面马兰黄土中弱古土壤层划分为 S_1 也是不合适的。同时，受释光年龄测定的精度、范围限制及古地磁定年的局限性，对剖面内部的地层划分尚须进一步研究。

参考文献/References

[1] 蒋复初，吴锡浩，肖华国，等. 郑州邙山桃花峪高分辨率晚更新世黄土地层［J］. 地质力学学报，1997，3（2）：11～17.
JIANG Fuchu，WU Xihao，XIAO Huaguo，et al. The high-resolution late Pleistocene loess stratigraphy in Taohuayu，Mangshan，Zhengzhou［J］. Journal of Geomechanics，1997，3（2）：11～17.（in Chinese with English abstract）

[2] 杨革联，赵希涛，朱日祥，等. 河南荥阳孤柏嘴黄土剖面磁性地层学初步研究［J］. 现代地质，2001，15（1）：35～39.
YANG Gelian，ZHAO Xitao，ZHU Rixiang，et al. A Preliminary study in magnetostratigraphy of Gubaizui loess section in Xingyang，Henan Province［J］. Geoscience，2001，15（1）：35～39.（in Chinese with English abstract）

[3] 蒋复初，吴锡浩，孙东怀，等. 中原邙山黄土地层［J］. 地质力学学报，1998，4（4）：12～18.
JIANG Fuchu，WU Xihao，SUN Donghuai，et al. On Mangshan loess stratigraphy in China central plains［J］. Journal of Geomechanics，1998，4（4）：12～18.（in Chinese with English abstract）

[4] 蒋复初，吴锡浩，肖华国，等. 中原邙山黄土及构造与气候耦合作用［J］. 海洋地质与第四纪地质，1999，19（1）：45～51.
JIANG Fuchu，WU Xihao，XIAO Huaguo，et al. Mangshan loess in China Central Plains and the coupling effect between tectonics and climate［J］. Marine Geology & Quaternary Geology，1999，19（1）：45～51.（in Chinese with English abstract）

[5] 蒋复初，王书兵，赵志中，等. 中原邙山黄土与末次间冰期以来古季风特征［J］. 地质论评，2004，50（5）：554～560.
JIANG Fuchu，WANG Shubing，ZHAO Zhizhong，et al. The Mangshan loess in Central China and Paleomonsoon characteristic since the last interglacial stage［J］. Geological Review，2004，50（5）：554～560.（in Chinese with English abstract）

[6] Wu X H，Jiang F C，Xiao H G，et al. Mangshan loess on China's Central Plain and its response to tectonic movement and climate［J］. Science in China（Series D），1999，42（5）：465～473.

[7] Jiang F C，Wang S B，Zhao Z Z，et al. Mangshan loess in Central China and the Paleomonsoon variations since the Last Interglaciation［J］. Acta Geologica Sinica（English Edition），2004，78（3）：813～819.

[8] Jiang F C，Fu J L，Wang S B，et al. Formation of the Yellow River，inferred from loess-palaeosol sequence in Mangshan and lacustrine sediments in Sanmen Gorge，China［J］. Quaternary International，2007，175（1）：62～70.

[9] Xiao H G，Wu X H，Jiang F C，et al. The Palaeoclimate variations in the central plains since the interstade of the Last Glacial stage［J］. Acta Geologica Sinica（English Edition），1998，72（1）：108～119.

[10] Prins M A，Zheng H B，Beets K，et al. Dust supply from river floodplains：the case of the lower Huang He（Yellow River）recorded in a loess-palaeosol sequence from the Mangshan Plateau［J］. Journal of Quaternary Science，2009，24（1）：75～84.

[11] Peterse F，Prins M A，Beets C J，et al. Decoupled warming and monsoon precipitation in East Asia over the last deglaciation［J］. Earth and Planetary Science Letters，2011，301（1/2）：256～264.

[12] Peterse F，Martínez-García A，Zhou B，et al. Molecular records of continental air temperature and monsoon precipitation variability in East Asia spanning the past 130，000 years［J］. Quaternary Science Reviews，2014，83：76～82.

[13] 陈立业，张珂，傅建利，等. 邙山黄土 L_5 以来的常量元素地球化学特征及其对物源的指示意义［J］. 第四纪研究，2017，37（6）：1293～1308.
CHEN Liye，ZHANG Ke，FU Jianli，et al. Major element geochemical characteristics of Mangshan Loess since L_5 and its implications for provenance［J］. Quaternary Sciences，2017，37（6）：1293～1308.（in Chinese with English abstract）

[14] Jin C S，Liu Q S. Revisiting the stratigraphic position of the Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity boundary in Chinese loess［J］. Palaeogeography，Palaeoclimatology，Palaeoecology，2011，299（1/2）：309～317.

[15] Zheng H B，Huang X T，Ji J L，et al. Ultra-high rates of loess sedimentation at Zhengzhou since Stage 7：Implication for the Yellow River erosion of the Sanmen Gorge［J］. Geomorphology，2007，85（3/4）：131～142.

[16] 季军良，郑洪波，刘锐，等. 邙山黄土地层再研究［J］. 海洋地质与第四纪地质，2004，24（4）：101～108.
JI Junliang，ZHENG Hongbo，LIU Rui，et al. Restudy on the stratigraphy of Mangshan loess［J］. Marine Geology & Quaternary Geology，2004，24（4）：101～108.（in Chinese with English abstract）

[17] Qiu F Y，Zhou L P. A new luminescence chronology for the Mangshan loess-palaeosol sequence on the southern bank of the Yellow River in Henan，central China［J］. Quaternary Geochronology，2015，30：24～33.

[18] 王玉振，王书兵，王喜生，等. 郑州邙山官庄峪黄土地层研究［J］. 地质力学学报，2015，21（3）：393～398.
WANG Yuzhen，WANG Shubing，WANG Xisheng，et al. Study on the Guanzhuangyu loess stratigraphy in Mangshan，Zhengzhou［J］. Journal of Geomechanics，2015，21（3）：

393 ~ 398.（in Chinese with English abstract）

[19] Jin C S, Liu Q S. Remagnetization mechanism and a new age model for L9 in Chinese loess [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2011, 187 (3/4): 261 ~ 275.

[20] Liu Q S, Roberts A P, Rohling E J, et al. Post-depositional remanent magnetization lock-in and the location of the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal boundary in marine and Chinese loess sequences [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 275 (1/2): 102 ~ 110.

[21] Yang T S, Hyodo M, Yang Z Y, et al. Multiple rapid polarity swings during the Matuyama - Brunhes transition from two high - resolution loess - paleosol records [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2010, 115 (B5): B05101, doi: 10. 1029/2009JB006301.

[22] Wang X S, Løvlie R, Chen Y, et al. The Matuyama-Brunhes polarity reversal in four Chinese loess records: High-fidelity recording of geomagnetic field behavior or a less than reliable chronostratigraphic marker? [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 101: 61 ~ 76.

[23] Wang X S, Yang Z Y, Løvlie R, et al. A magnetostratigraphic reassessment of correlation between Chinese loess and marine oxygen isotope records over the last 1. 1 Ma [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2006, 159 (1/2): 109 ~ 117.

[24] Wang X S, Løvlie R, Yang Z Y, et al. Remagnetization of Quaternary eolian deposits: a case study from SE Chinese Loess Plateau [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2005, 6 (6): Q06H18, doi: 10. 1029/2004GC000901.

[25] 王喜生，杨振宇，REIDAR L，等. 三门峡地区黄土 L_9 的重磁化现象及原因探析 [J]. 第四纪研究，2005，25（4）：453 ~ 460.

WANG Xisheng, YANG Zhenyu, REIDAR L, et al. Remagnetization of L_9 in the Sanmenxia area and preliminary analysis of remagnetization mechanisms [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25 (4): 453 ~ 460. (in Chinese with English abstract)

[26] Wang D J, Wang Y C, Han J T, et al. Geomagnetic anomalies recorded in L9 of the Songjiadian loess section in southeastern Chinese Loess Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (6): 520 ~ 529, doi: 10. 1007/s11434-009-0565-9.

[27] Liu W M, Zhang L Y. Chemical magnetization in Chinese loess [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2013, 218: 14 ~ 18.

[28] 刘维明，张立原，孙继敏. 高分辨率洛川剖面黄土磁性地层学 [J]. 地球物理学报，2010，53（4）：888 ~ 894，doi：10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 04. 013.

LIU Weiming, ZHANG Liyuan, SUN Jimin. High resolution magnetostratigraphy of the Luochuan loess-paleosol sequence in the central Chinese Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53 (4): 888 ~ 894, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 04. 013. (in Chinese with English abstract)

[29] Sun J M, Liu T S. Stratigraphic evidence for the uplift of the Tibetan Plateau between - 1. 1 and - 0. 9 myr ago [J]. Quaternary Research, 2000, 54 (3): 309 ~ 320.

[30] Evans M E, Heller F. Magnetism of loess/palaeosol sequences: Recent developments [J]. Earth-Science Reviews, 2001, 54 (1/3): 129 ~ 144.

[31] Rhodes E J. Optically stimulated luminescence dating of sediments over the past 200, 000 years [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2011, 39: 461 ~ 488.

[32] 康树刚，王旭龙，王松娜. 中国黄土释光测年与应用：过去、现在与未来 [J]. 地球环境学报，2016，7（5）：442 ~ 467.

KANG Shugang, WANG Xulong, WANG Songna. Luminescence dating of Chinese loess and its applications: Past, present and future [J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7 (5): 442 ~ 467. (in Chinese with English abstract)

[33] Li B, Roberts R G, Jacobs Z, et al. Construction of a 'global standardised growth curve' (gSGC) for infrared stimulated luminescence dating of K-feldspar [J]. Quaternary Geochronology, 2015, 27: 119 ~ 130.

[34] Li B, Roberts R G, Jacobs Z, et al. Potential of establishing a 'global standardised growth curve' (gSGC) for optical dating of quartz from sediments [J]. Quaternary Geochronology, 2015, 27: 94 ~ 104.

[35] Li B, Li S H. Luminescence dating of Chinese loess beyond 130 ka using the non-fading signal from K-feldspar [J]. Quaternary Geochronology, 2012, 10: 24 ~ 31.

[36] Li B, Jacobs Z, Roberts R G, et al. Extending the age limit of luminescence dating using the dose-dependent sensitivity of MET-pIRIR signals from K-feldspar [J]. Quaternary Geochronology, 2013, 17: 55 ~ 67.

[37] Chen Y W, Li S H, Li B, et al. Maximum age limitation in luminescence dating of Chinese loess using the multiple-aliquot MET-pIRIR signals from K-feldspar [J]. Quaternary Geochronology, 2015, 30: 207 ~ 212.

[38] Wang X L, Wintle A G, Lu Y C. Thermally transferred luminescence in fine-grained quartz from Chinese loess: basic observations [J]. Radiation Measurements, 2006, 41 (6): 649 ~ 658.

[39] Wang X L, Lu Y C, Wintle A G. Recuperated OSL dating of fine-grained quartz in Chinese loess [J]. Quaternary Geochronology, 2006, 1 (2): 89 ~ 100.

[40] 刘嘉麒，陈铁梅，聂高众，等. 渭南黄土剖面的年龄测定及十五万年来高分辨时间序列的建立 [J]. 第四纪研究，1994，14（3）：193 ~ 202.

LIU Jiaqi, CHEN Tiemei, NIE Gaozhong, et al. Datings and reconstruction of the high resolution time series in the Weinan loess section of the last 150 000 years [J]. Quaternary Sciences, 1994, 14 (3): 193 ~ 202. (in Chinese with English abstract)

[41] 王文远，刘嘉麒，潘懋，等. 末次间冰期以来黄土-古土壤的热释光测年—渭南、会宁剖面的对比研究 [J]. 海洋地

质与第四纪地质, 2000, 20 (3): 67 ~ 72.
WANG Wenyuan, LIU Jiaqi, PAN Mao, et al. Thermoluminescent dating of the loess sequence of the late Quaternary—the comparing study on the Weinan and Huining sections [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20 (3): 67 ~ 72. (in Chinese with English abstract)

[42] Lu Y C, Wang X L, Wintle A G. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130, 000 yr for the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Research, 2007, 67 (1): 152 ~ 160.

[43] Lai Z P. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 37 (2): 176 ~ 185.

[44] Kang S G, Lu Y C, Wang X L. Closely-spaced recuperated OSL dating of the last interglacial paleosol in the southeastern margin of the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Geochronology, 2011, 6 (5): 480 ~ 490.

[45] Lü T Y, Sun J M, Li S H, et al. Vertical variations of luminescence sensitivity of quartz grains from loess/paleosol of Luochuan section in the central Chinese Loess Plateau since the last interglacial [J]. Quaternary Geochronology, 2014, 22: 107 ~ 115.

[46] 赵华, 蒋复初, 卢演俦. 郑州邙山马兰黄土的光释光 (OSL) 测年初步研究 [J]. 地质力学学报, 1998, 4 (4): 19 ~ 29.
ZHAO Hua, JIANG Fuchu, LU Yanchou. Preliminary study of OSL dating of the Malan loess at Mangshan Plateau, Zhengzhou, Henan Province [J]. Journal of Geomechanics, 1998, 4 (4): 19 ~ 29. (in Chinese with English abstract)