

洛阳扣马黄土色度特征及其环境意义

潘 航

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年6月27日; 录用日期: 2025年7月28日; 发布日期: 2025年8月6日

摘 要

黄土在中国沉积广泛, 是研究气候与环境变化的良好载体。本文对位于黄土高原东南缘的扣马黄土展开研究, 使用CM-700D型分光测色计测量了908个黄土-古土壤样品的色度。研究表明, 1.2 Ma以来, 黄土高原东南缘气候整体呈冷干化趋势, 很大程度上受到全球气候变化的影响。同时, 自0.25 Ma以来, 可能受到近源黄河河漫滩物质影响, 扣马黄土的色度和磁化率指标都发生了很大变化。扣马的黄土-古土壤序列沉积, 很可能受到全球气候与沉积环境变化的双重影响。

关键词

色度, 黄土-古土壤序列, 黄河演化, 气候变化

The Chromaticity Characteristics and Environmental Significance of Luoyang Kouma Loess

Hang Pan

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Jun. 27th, 2025; accepted: Jul. 28th, 2025; published: Aug. 6th, 2025

Abstract

Loess is widely deposited in China and is a good carrier for studying climate and environmental changes. This article conducts research on the Kouma loess located on the southeastern edge of the Loess Plateau. 908 loess samples were measured using CM-700D spectrophotometer and Bartington MS2C magnetometer, respectively. Research has shown that since 1.2 Ma, the climate in the southeastern margin of the Loess Plateau has shown an overall trend of cooling and drying, influenced by global climate change. Meanwhile, since 0.25 Ma, significant changes have occurred in the

chromaticity and magnetic susceptibility indicators of the Kouma loess due to the influence of materials from nearby river floodplains. The sedimentation of the loess paleosol sequence in Kouma may be influenced by both global climate change and changes in sedimentary environments.

Keywords

Chromaticity, Loess Paleosol Sequence, Yellow River Evolution, Climate Change

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国黄土分布广泛,大致沿昆仑山、秦岭以北,阿尔泰山、阿拉善和大兴安岭一线以南分布[1]。黄土蕴含着丰富的古气候信息,且沉积连续、稳定,粒度较细,详细记录了中新世以来亚洲内陆干旱地区的环境与气候变化历史[2]。因此,许多学者在过去几十年中,对中国乃至全世界的风成黄土展开了大量研究,取得了许多重要进展,在黄土成因[3]、对气候变化的指示作用[4]-[6]、形成的时间序列[7]等方面获得了一系列重要成果。对于中国黄土的研究,大部分集中于黄土高原内部,对于黄土高原东南缘的研究相对较少。该地区位于黄河中游与下游的交界处,深受夏季东南季风影响,对气候变化十分敏感,且物源复杂,沉积环境多变。前人采用环境磁学、粒度、磁性地层学等方法,对黄土高原东南缘地区黄土展开了大量且详实的研究[8]-[11]。然而,关于黄河演变和气候变化对当地土壤色度的影响却鲜有报道。

土壤颜色是土壤的重要特征,与土壤含水量、有机质含量、粒度等因素有着密切的联系。其颜色的变化,对气候以及沉积环境的变化有重要的指示作用,一定程度上反映了土壤的发育程度[12][13]。近几十年,沉积物色度作为气候与沉积环境变化的替代指标,得到了广泛应用。陈一萌等[14]将色度指标与气候变化指标进行了对比分析,认为在百年尺度、千年尺度、万年尺度上均能作为气候变化的代用指标,且十分可靠。陈杰等[15]以帕米尔高原黄土-古土壤为研究对象,发现红度的变化较为明显,且与磁化率指标呈负相关关系,能准确识别该地古气候变化过程。石培宏等[16]通过对靖远剖面黄土研究后发现,该地磁化率指标无法很好地反映气候、土壤发育情况,而色度指标的引入能很好地弥补这一缺陷。沈曼丽等[17]将西津黄土色度与深海氧同位素、频率磁化率进行对比,识别出黄土高原西部地区在 1.24 Ma 和 0.43 Ma 曾发生过两次气候转型事件。因此,色度指标已经作为一种常用的气候代用指标,已经得到了广泛应用,特别是在部分物源复杂、气候湿润地区,当磁化率指标无法很好地指示成壤作用和气候变化时,色度指标的引入就显得尤为重要[18]。

因此,本文在前人研究的基础上,对黄土高原东南缘的扣马黄土色度指标进行定量研究,并与潘保田等[19]已发表的扣马剖面磁化率指标相结合,探讨该地区环境、气候变化及黄河演变过程。

2. 研究区概况

扣马剖面(34°47'N, 112°46'E)位于洛阳市孟津区扣马村,北邻黄河,南靠邙山山脉,处于黄河流出三门峡基岩山地、进入华北平原的过渡区域,地形较为平坦,是我国东部湿润区与半湿润区的过渡地带[20]。扣马段黄河流经华北断坳这一构造单元,且位于一条东西走向、长约 30 km 的正断层附近[21]。黄河在扣马村附近形成了三级阶地,除最高级阶地 T3 为基座阶地以外,其余两级阶地 T2、T1 均为堆积阶地[22]。通过野外观察,发现 T3 发育了较厚的黄土-古土壤序列,且标志层 S5 与 L9 均可清晰辨别,结合磁化

率曲线[19], 可以认为 S14 即为该剖面基底, 发育于河流砾石层之上, 形成时代约为 1.2 Ma。

根据当地气象观测资料显示, 孟津区属温带大陆性气候, 受东亚季风影响强烈。东亚季风又分为东亚夏季风(EASM)和东亚冬季风(EAWM), 当地夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 平均气温为 13℃~14℃, 年平均降水量为 600 mm~700 mm [23]。根据全国风资料 1961~1970 年时间风资料统计[24], 河南中东部地区冬季主要受东北风影响, 且因受到西部山脉阻挡, 西北冬季风相对较为微弱。

3. 样品采集与实验方法

本文所研究的扣马剖面沉积于黄河附近的 T3 河流阶地之上, 厚度约为 45 m, 以 5 cm 间隔, 从上往下连续采集样品, 共采集样品 908 个。色度实验采用日本柯尼卡美能达公司生产的 CM-700D 分光测色仪进行测量, 在实验过程中, 保持背景光源色温为 6500 K 且亮度稳定。在测量过程中, 本研究选用 CIELAB 表色系统, 色度参数包括亮度(L*)、红度(a*)、黄度(b*)。具体实验步骤如下: ① 将样品置于实验室通风处, 自然风干。② 使用研钵将黄土块状物研磨至 200 目以下。③ 连通电源并开启设备, 进行零位校准及白板校准。④ 取约 6 g 的样品放入专用的 CM-A184 型粉末测试装置中, 轻轻压实, 使表面尽量平整。⑤ 连续测试 3 次, 分别得到三组 L*(亮度)、a*(红度)、b*(黄度)数据, 取其平均值。以上实验在浙江师范大学环境磁学实验室进行。

4. 结果与分析

4.1. 红度

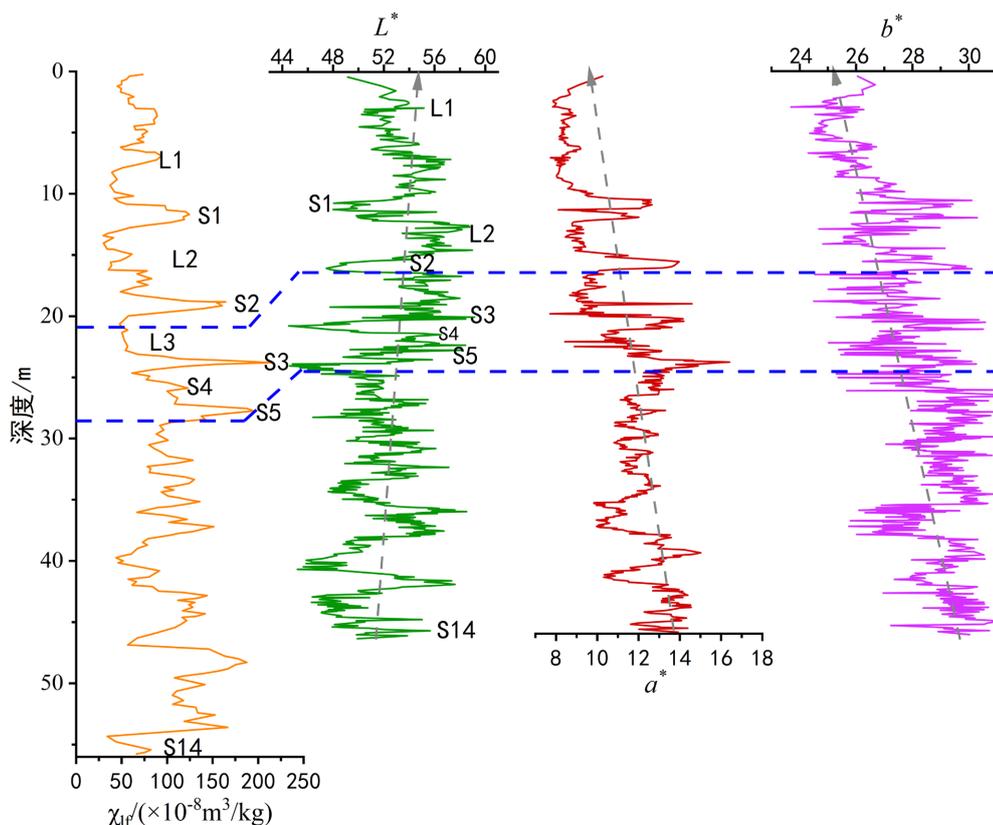


Figure 1. The chromaticity and magnetic susceptibility of the Kouma loess paleosol sequence change with depth, and the magnetic susceptibility curve is quoted from reference [19]

图 1. 扣马黄土 - 古土壤序列色度、磁化率随深度变化图, 磁化率曲线引自文献[19]

前人研究表明,红度主要由土壤中的赤铁矿含量控制,而碳酸盐和有机质含量则对其影响不大[25]。从图 1 中可知,扣马剖面的红度变化范围较大,为 7.71~16.41,变化幅度(变化幅度 = [(最大值 - 最小值)/最小值 × 100%])为 1.12。从整体来看,扣马剖面的红度呈现持续减小的趋势,且不同的层位中 a^* 值差异明显。古土壤层中,红度的平均值为 12.31,最高值出现在 S5。而黄土层中,红度的平均值仅为 10.5,最低值出现在 L1。总体而言,扣马黄土红度曲线与磁化率曲线有较好的一致性,但也存在着一些差别。比如扣马磁化率峰值出现在 S3,而红度峰值则出现在 S5,这可能是由于扣马剖面位于夏季风强烈影响区域,在 S5 形成时期,降水量大,土壤过度湿润,导致磁铁矿在还原环境下转化为赤铁矿[26]。

4.2. 黄度

研究表明,土壤的黄度主要受针铁矿含量的影响[27]。与红度相比,黄度的变化范围相对较小,介于 23.69~31.9 之间,变化幅度为 0.34。扣马黄土的黄度整体变化趋势与红度相似,也呈现整体减少的趋势,其变化规律与红度较为一致,这可能指示着扣马黄土受到气候、环境变化控制,其赤铁矿和针铁矿的含量持续减少,符合第四纪以来气候整体干旱化的趋势。在不同层位中,黄度存在着一定差异,黄土的平均值为 27.7,而古土壤则为 28.6,和红度类似的是,古土壤的黄度高于黄土,但差异不如红度明显,总体变化幅度较小。

4.3. 亮度

扣马黄土剖面的亮度值整体大于其红度、黄度,且呈现增大的趋势,其曲线变化趋势与红度、黄度、磁化率相反,变化范围为 44.51~59.16,平均值为 52.3,变化幅度为 0.33。一般来说,黄土的亮度受土壤中碳酸钙、有机质、有效降水量等因素影响[28]。扣马黄土的亮度变化波动较小,但一定程度上也能反映气候与沉积环境变化。如 S2 以来,扣马的亮度整体处于较高值,与此相对应的是,红度处于最低值。由此可见,亮度和红度呈反相关关系,这是由于亮度的相关系数受红度、黄度颜色分量的影响,故红度和黄度成为了影响亮度的主要原因[15]。扣马位于黄土高原东南缘,深受亚洲夏季风影响,夏季高温多雨,成壤作用强,形成较多赤铁矿与针铁矿,导致黄土的亮度降低。

5. 讨论

扣马黄土形成地区位于中国黄土高原边缘,相较于黄土高原内部,其纬度较低且离海洋更近,因此,气候条件相比于位于其西北部地区也有较大差别。与其他地区黄土(如西津、洛川黄土)相比[17],扣马剖面的红度、黄度明显偏高,而亮度则明显偏低,指示磁性矿物含量的磁化率也高于中部的黄土。前人的研究结果表明,红度主要受土壤中赤铁矿含量影响,随着赤铁矿含量的增加而增加,而磁铁矿对红度的影响则微乎其微[16][29]。扣马黄土剖面所处的洛阳市偃师区的现代气候类型为温带季风气候,夏季高温多雨,降水量远远多于黄土高原内部地区,土壤成壤作用强,易形成磁性矿物,如磁铁矿、赤铁矿、针铁矿,这一现象在磁化率、色度指标上都能很好地进行体现。值得注意的是,扣马地区的红度、黄度、磁化率指标从整体来看不断降低,而亮度则逐渐提升,这与第四纪以来全球气候整体干旱化相符合。色度指标与磁化率相结合,可以灵敏地反映气候变化,对降水和温度变化十分敏感。

黄土沉积物各项指标的特征不仅与气候变化密切相关,还与当地沉积环境的变化有一定的关系。扣马剖面位于黄河沿岸,黄河水系变化导致的沉积环境变化,也对沿岸黄土物源有较大的影响。李兴文等[9]通过对三门峡会兴沟剖面展开环境磁学研究后发现,当地 S8 的磁化率明显偏低,推测这是由于当地 S8 主要是以近河源漫滩的冲积黏土、粉砂为母质发育而成的,化学风化程度较高,因此来自西北内陆地区的原生黄土磁性颗粒被破坏或转化,这与扣马 S14 之上的黄土是类似的。扣马 S13-S14 整体磁化率与临近的曹村、马坡[8][11]剖面同层位相比明显偏低,但红度、黄度依旧较高,这可能是由于在 1.2 Ma 左

右黄河贯通[19] [30], 黄河河床坡度变大、流速加快, S14 在黄河下切形成阶地 T3 过程中, 受到短暂的流水作用, 黄土颗粒在沉积后被河水浸泡, 损失了较多磁性矿物颗粒, 转化为赤铁矿或针铁矿。故 S13-S14 磁化率较低, 而红度、黄度则较高, 这一现象可能和黄河水系变化有密切联系。

由图 1 可知, 扣马 S2 以来形成的黄土也具有一定的特殊性。与位于其西部不远处的荥阳邙山剖面类似[31], 扣马黄土 - 古土壤序列自 S2 以来沉积速率急剧增加, 且 L1、L2 与其他黄土层位相比, 磁化率、红度和黄度明显偏低, 而亮度指标则明显偏高。王均平等[32]发现扣马剖面 L2 至顶部的黄土砂粒含量明显增加, 尤其是黄土层均在 10% 以上, 甚至高于离沙漠更近的吴堡、延长剖面, 这种现象明显不符合黄土高原黄土沉积特征。丁仲礼[33]等对黄土高原不同地区黄土进行了粒度测试, 发现砂粒百分含量从南到北降低的趋势十分明显, 而扣马剖面就不符合这一规律。在黄土沉积区, 黄土物质的来源受到物源变化、搬运动力大小等影响。根据风洞实验表明, $>32\ \mu\text{m}$ 的颗粒很难在空中被长距离搬运。即使是在极端猛烈的风暴条件下, 也仅仅只能运移几百千米[34]。扣马剖面距离位于西北干旱区的沙漠十分遥远, 故来自西北沙漠的风尘物质并非其粗颗粒主要来源。因此, 扣马 S2 以来沉积速率急剧增加, 色度和磁化率处于极端值的原因极有可能与近源的输入有关, 即附近存在一个显著的物源贡献区。

黄河孟津至扣马段共形成了三级阶地, 本文所研究的扣马剖面即位于 T3 之上[35], 而 T2 形成的时间为 0.25 Ma, 恰好与 S2 形成时间一致。因此, S2 以来的黄土沉积变化可能与阶地的形成有关。在形成河流阶地过程之初, 黄河不断下切, 流速加快, 河流携带大量较粗泥沙, 流经扣马时比降减小, 流速变慢, 大量沉积物沉积于河漫滩, 在枯水期时暴露于空气中。该地冬季、秋季盛行偏北风[36], 在风力搬运作用下, 遇更老的河流阶地 T3 阻挡, 沉积于此。因此, 扣马剖面 S2 以来的黄土磁化率与色度既受全球气候的影响, 也受到黄河水系演变导致的物源变化影响, 单一指标或许无法很好地反映当地气候或沉积环境变化。

6. 结论

(1) 1.2 Ma 以来, 扣马黄土 - 古土壤序列磁化率、红度、黄度持续减小, 亮度持续增大。将色度与磁化率指标相结合, 可以反映当地气候的变化与第四纪全球气候变化相似, 整体上呈现干冷化趋势。

(2) 0.25 Ma 以来, 扣马黄土的沉积环境发生了很大的变化, 黄土沉积速率增加, 色度和磁化率变化很大, 这可能与河流阶地的形成有密切的联系。因此, 使用色度、磁化率或其他气候代用指标时, 应充分考虑当地区域环境变化, 以便能更好地识别气候变化信号。

参考文献

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] Guo, Z.T., Ruddiman, W.F., Hao, Q.Z., Wu, H.B., Qiao, Y.S., Zhu, R.X., *et al.* (2002) Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, **416**, 159-163. <https://doi.org/10.1038/416159a>
- [3] 赵景波. 黄土的本质与形成模式[J]. 沉积学报, 2003(2): 198-204.
- [4] Ning, W., Zan, J., Fang, X., Kang, J., Wang, S. and Hu, Z. (2025) Intensified Glacial Conditions Drove the Long-Term Decrease of the Hematite Content of Asian Dust in an Icehouse World. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **666**, Article ID: 112834. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2025.112834>
- [5] Wang, Y., Jia, J., Liu, H., Lu, H., Lu, C. and Xia, D. (2018) Iron Mineralogy Characteristics of the Desert Sediments of the Tarim Basin and Its Provenance Implications. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **55**, 1384-1388. <https://doi.org/10.1139/cjes-2018-0105>
- [6] 孙有斌, 周杰, 鹿化煜, 等. 风化土壤对原始粉尘粒度组成的改造证据[J]. 中国沙漠, 2002(1): 16-20.
- [7] Ding, Z.L., Derbyshire, E., Yang, S.L., Yu, Z.W., Xiong, S.F. and Liu, T.S. (2002) Stacked 2.6-Myr Grain Size Record from the Chinese Loess Based on Five Sections and Correlation with the Deep-Sea $\delta^{18}\text{O}$ Record. *Paleoceanography*, **17**, 5-1-5-21. <https://doi.org/10.1029/2001pa000725>

- [8] 王喜生, 杨振宇, 等. 黄土高原东南缘黄土-古土壤序列的环境磁学结果及其古气候意义[J]. 科学通报, 2006(13): 1575-1582.
- [9] 李兴文, 张鹏, 强小科, 等. 三门峡会兴沟剖面黄土-古土壤序列的岩石磁学研究[J]. 地球科学进展, 2017, 32(5): 513-523.
- [10] Hu, Z., Pan, B., Guo, L., Vandenberghe, J., Liu, X., Wang, J., *et al.* (2016) Rapid Fluvial Incision and Headward Erosion by the Yellow River along the Jinshaan Gorge during the Past 1.2 Ma as a Result of Tectonic Extension. *Quaternary Science Reviews*, **133**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.12.003>
- [11] Chen, Q., Liu, X., Zhao, G., Jia, J., Ye, W., Lü, B., *et al.* (2022) 0.2 Ma or 1.2 Ma? Timing of the Linking of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River Inferred from Loess-Palaeosol Sequences. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2021GL097510. <https://doi.org/10.1029/2021gl097510>
- [12] 朱丽东, 周尚哲, 李凤全, 等. 庐山 JL 红土剖面的色度气候意义[J]. 热带地理, 2007(3): 193-197, 202.
- [13] 李琼, 潘保田, 高红山, 等. 腾格里沙漠南缘末次冰盛期以来沙漠演化与气候变化[J]. 中国沙漠, 2006(6): 875-879.
- [14] 陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 等. 土壤颜色-一个可靠的气候变化代用指标[J]. 干旱区地理, 2006(3): 309-313.
- [15] 陈杰, 杨太保, 曾彪, 等. 中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义[J]. 沉积学报, 2018, 36(2): 333-342.
- [16] 石培宏, 杨太保, 田庆春, 等. 靖远黄土-古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(2): 15-23.
- [17] 沈曼丽, 张军, 惠争闯. 兰州西津黄土色度指标记录的第四纪气候演化[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3): 809-817.
- [18] 刘峰, 王昊, 秦艺帆, 等. 南京周家山下蜀黄土色度特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 143-151.
- [19] 潘保田, 王均平, 高红山, 等. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示[J]. 科学通报, 2005(3): 255-261.
- [20] 王均平, 潘保田, 高红山, 等. 豫西黄土中砂粒含量及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2005(5): 629-634.
- [21] He, W., Wei, L., Xu, S., Wan, S., Yang, J. and Liu, M. (2022) Late Quaternary Activity: Kouma Fault. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article 908899. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.908899>
- [22] Su, H., Wang, J., Pan, B., Ming, Q. and Li, Q. (2009) Sequences and Genesis of the Yellow River Terraces from Sanmen Gorge to Kouma. *Journal of Geographical Sciences*, **19**, 351-358. <https://doi.org/10.1007/s11442-009-0351-2>
- [23] 中华人民共和国民政部, 编, 黄树贤, 总主编, 张克强本卷, 主编. 中华人民共和国政区大典·河南省卷[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2017: 538-541.
- [24] 中国气象局. 中国风资料 1961-1970[M]. 北京: 中国气象局, 1974.
- [25] Schwertmann, U. (1958) The Effect of Pedogenic Environments on Iron Oxide Minerals. In: Stewart, B.A., Ed., *Advances in Soil Science*, Springer, 171-200. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3_5
- [26] 刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生, 等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨[J]. 第四纪研究, 2007(2): 210-220.
- [27] 何柳, 孙有斌, 安芷生. 中国黄土颜色变化的控制因素和古气候意义[J]. 地球化学, 2010, 39(5): 447-455.
- [28] Sun, Y., He, L., Liang, L. and An, Z. (2011) Changing Color of Chinese Loess: Geochemical Constraint and Paleoclimatic Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, **40**, 1131-1138. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.08.006>
- [29] Sun, Y., Chen, J., Clemens, S.C., Liu, Q., Ji, J. and Tada, R. (2006) East Asian Monsoon Variability over the Last Seven Glacial Cycles Recorded by a Loess Sequence from the Northwestern Chinese Loess Plateau. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **7**, 1-16. <https://doi.org/10.1029/2006gc001287>
- [30] Wang, X., Hu, G., Saito, Y., Ni, G., Hu, H., Yu, Z., *et al.* (2022) Did the Modern Yellow River Form at the Mid-Pleistocene Transition? *Science Bulletin*, **67**, 1603-1610. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.06.003>
- [31] Jiang, F., Fu, J., Wang, S., Sun, D. and Zhao, Z. (2007) Formation of the Yellow River, Inferred from Loess-Palaeosol Sequence in Mangshan and Lacustrine Sediments in Sanmen Gorge, China. *Quaternary International*, **175**, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.03.022>
- [32] 王均平. 豫西黄河贯通及其环境效应[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2003.
- [33] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠-黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1999(1): 82-87.
- [34] Tsoar, H. and Pye, K. (1987) Dust Transport and the Question of Desert Loess Formation. *Sedimentology*, **34**, 139-153.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1987.tb00566.x>

- [35] 苏怀, 王均平, 潘保田, 等. 黄河三门峡至扣马段的阶地序列及成因[J]. 地理学报, 2008(7): 744-750.
- [36] 曹宏伟. 豫南黄土理化特性及其古环境意义[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2019.