

中国黄土地层研究进展浅析

王迎国^{1,2,3,4}, 徐艳^{1,2,3,4}, 周航^{1,2,3,4}

¹陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

²陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年10月20日; 录用日期: 2021年11月23日; 发布日期: 2021年11月30日

摘要

作为过去气候记录的三大天书之一, 黄土不仅塑造了独特的黄土高原地貌, 还在很大程度上帮助科学家理解过去气候变化的过程及其机制。通过对当前中国的黄土研究现状的总结, 得出以下结论: (1) 中国的黄土最早是在中新世早期形成的, 但是第四纪的黄土最为典型; (2) 第四纪黄土按照时代关系从老到新可以分为午城黄土、离石黄土、马兰黄土和坡头黄土, 在第四纪黄土中共发育37层黄土-古土壤旋回, 分别对应着37次的气候冷暖波动; (3) 黄土的形成是东亚季风的产物, 但对于东亚季风形成原因仍不甚清楚。

关键词

中国黄土, 第四纪, 东亚季风

Analysis on the Research Progress of the Chinese Loess

Yingguo Wang^{1,2,3,4}, Yan Xu^{1,2,3,4}, Hang Zhou^{1,2,3,4}

¹Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 20th, 2021; accepted: Nov. 23rd, 2021; published: Nov. 30th, 2021

Abstract

As one of the three natural records for the past climate, loess not only shapes the unique landform of the Loess Plateau, but also extremely helps scientists understand the process and mechanism of climate change in the past. Based on the summary of the current research status of loess in China, the conclusions can be drawn as follow: (1) Loess in China was first formed in the early Miocene, but Quaternary loess is the most typical; (2) Quaternary loess can be divided into Wucheng loess, Lishi loess, Malan loess and Potou loess according to the age relationship and they can also be divided into 37 layers of loess-paleosol cycles in Quaternary loess, corresponding to 37 climate fluctuations; (3) The formation of loess is the product of East Asian monsoon, but the cause of formation of East Asian monsoon is still unclear.

Keywords

Chinese Loess, Quaternary, East Asian Monsoon

Copyright © 2022 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

2.6 Ma B.P.以来,地球气候发生了巨大的变化,尤其是显著的冰期-间冰期旋回[1]。作为过去全球气候变化研究的三大支柱之一[2],黄土获得了古气候研究领域学者的广泛关注,尤其是在中国。从上世纪以来大量的研究[3]-[14]从不同的方面研究了中国的黄土,包括粒度、磁化率、地层特征、生物指标、化学成分、分布、气候特征等。如上世纪70年代左右,刘东生先生通过对黄土高原地区十多年的系统考察和研究,从黄土的地层分布高程、沉积厚度、物质组成、沉积结构与构造、生物化石、与基岩物质成分和接触关系等特征及其空间变化,提出了黄土风成说,并得到国际上的广泛认可,之后又系统地研究了黄土的分布、磁化率等特征[4]。郭正堂通过对比将第四纪黄土延伸到中新世黄土,将其形成时间扩展到22 Ma [15];安芷生结合通过对黄土中一系列气候指标的研究将其和季风的关系进行了讨论[16];郭正堂结合黄土的成因阐释了亚洲荒漠化的起源及发展过程[17];鹿化煜通过黄土的粒度特征揭示了黄土中蕴含的气候特征[18]。

黄土是指经过风力搬运后沉积的,以粉砂质颗粒为主的气下碎屑沉积物[3]。其广泛分布于中国的黄土高原,占地面积达到40万平方公里,是第四纪研究中的重要组成部分[4]。黄土由黄土和古土壤组成[4],其中包含着过去的气候变化信息,对黄土的解译将有助于我们对过去气候变化情况加以把握,并对未来气候变化加以展望,有助于未来气候研究。在本文中,我们将对当前黄土的研究成果进行总结,并对未来黄土地层的研究加以展望。

2. 中国黄土地层特征

黄土是一种基本由风力搬运的以粉砂颗粒为主的气下陆相碎屑沉积物。黄土根据其成因可以将其分成暖黄土和冷黄土,其中冷黄土是指分布在冰盖边缘的黄土,而暖黄土是分布在沙漠边缘的黄土[4]。中国的黄土主要分布在长江以北,包括西北内陆盆地区域、中部黄土高原区、东部山前丘陵及平原,另外

川西、海滨等区域也存在少量黄土。除了中国的黄土外，世界其他地方也存在有黄土，如塞尔维亚的黄土[19]、多瑙河的黄土[20]、南美的黄土[21]、伊朗的黄土[22]、中亚的黄土[23]、欧洲的黄土[24]、北美的黄土[25]等，但在黄土地层的空间分布规模、连续性和地层序列的稳定性方面，中国的黄土高原都是独一无二的，也没有中国黄土这样典型，所以将中国黄土称为三大天书之一。

自黄土受到科学家的普遍关注以来，大量的研究[26] [27] [28] [29]关注于黄土的成因问题。目前普遍认同的是，原生的黄土都是风成成因的，而次生黄土由于会受到沉积后的其他地质营力的改造作用，而表现出其他成因的产物[4] [30]。总体上，黄土是风成成因的。黄土作为一种风成沉积物，其在地层上表现为独特的特征。典型的黄土地层由两种基本岩性单元构成，即黄土和古土壤，其中，黄土颜色相对较浅，多呈灰黄 - 棕黄色，质地疏松，粒度较粗；而古土壤颜色较深，多呈棕红 - 褐红色，质地紧密，粒度相比黄土较细，土壤结构发育，二者之间为渐变界线[4]。由于黄土中存在的这样相互叠置的黄土和古土壤单元，它们构成了较为独特的沉积旋回，再加上古地磁技术的应用[31]，黄土和古土壤二者构成了黄土高原区域一级地层的划分单元，并以此为基础，将黄土和古土壤分别划分为二级地层单元[4] [32]。目前比较粗略的地层划分是将第四纪黄土从下至上分为午城黄土、离石黄土、马兰黄土和坡头黄土[4]，其中午城黄土和离石黄土下部在年代上对应早更新世；离石黄土上分，在年代上对应中更新世；马兰黄土在年代上对应晚更新世；坡头黄土在年代上对应全新世。因此，根据黄土和古土壤的旋回特性，目前黄土中共发现有 37 个黄土 - 古土壤沉积旋回，意味着气候的 37 次气候旋回[33]。另外，目前发现黄土高原的黄土不只存在于第四纪，郭正堂通过详细的野外观察将黄土的下限延长到了早中新世，即黄土最早可能形成于 22 Ma [15]。

3. 黄土与气候变化

第四纪不仅是距离我们最近的一个地质时代，更是以显著的气候变化为特征[1]，而黄土作为连续的沉积物其在沉积的过程中便记录了这种气候变化的特征，因此黄土也和深海沉积物、冰芯一起被称为研究过去气候变化的三大天书。

自从黄土 - 古土壤沉积序列和深海氧同位素阶近乎完美地对应在一起后[32] [34]，大量的学者开始研究黄土中蕴含的气候特征[2] [5] [13] [18] [35] [36] [37] [38] [39]。黄土是指由风力搬运的以粉砂为主的气下碎屑沉积[3]。黄土的定义中强调搬运营力必须是风力搬运，粒度特征是以粉砂为主，而沉积环境是气下沉积，所以影响这三个条件的气候特征也是影响黄土形态的因素，所以黄土中的不同特性可以揭示不同的气候信息[3]。目前用于揭示黄土中蕴含的气候指标主要有磁化率、粒度、土壤形态、化学风化指数、有机质同位素、孢粉、蜗牛等[35]。

另外，中国黄土与深海氧同位素阶之间良好对应关系表明黄土也是一个极其重要的记录过去气候变化的载体，对过去 37 层黄土 - 古土壤旋回的研究也揭示出了过去气候变化的不同特征，如东亚夏季风和冬季风的演化、亚洲荒漠化的起源等。

3.1. 东亚季风的演化

由于中国特殊的地理特征，使得中国大部分地区都处在季风的影响之下，季风的存​​在极大地影响了中国的气候格局，尤其是受东亚季风控制的黄土高原的半干旱 - 半湿润气候。从黄土 - 古土壤的形成来看，其沉积物粒径的大小可以反映冬季风的强弱[18]，而磁化率的大小可以反映夏季风的强弱[33]，所以黄土 - 古土壤的形成是东亚季风作用的结果。

前人通过大量的工作利用黄土 - 古土壤中的不同气候指标揭示了东亚季风的演化[17] [39] [40]。目前主要认为，黄土是冬季风影响下形成的风尘堆积，而古土壤是夏季风影响下的黄土的风化产物，22 Ma

的风成红黏土的形成意味着东亚季风的起始[15],而在其后又存在几次季风的显著变化,在 3.6~2.6 Ma B.P. 由于青藏高原隆升的加快,冬季风和夏季风同时增强,到 2.6 Ma B.P. 夏季风逐渐减弱,而冬季风逐渐加强,从而形成了第四纪典型的黄土-古土壤序列[16]。

虽然东亚季风可能起源于 22 Ma,但是对于影响季风起源的因素仍不清楚,可能和青藏高原的阶段隆升有关,也可能和副特提斯海的退却有关或者其他别的原因[41],青藏高原形成和季风演化的关系有待进一步确认。

3.2. 亚洲荒漠化的起源

现今亚洲腹地干旱少雨,荒漠化普遍发育,但从行星风系的分布来看,在亚洲腹地出现荒漠化是不应该的,也就是说本来应该是副热带高压控制下的干旱区向北移动到了盛行西风气候区[17][42]。尽管前人做了很多工作来探讨亚洲荒漠化的起源,但是并不存在一个统一的定论,而亚洲荒漠起源的问题和亚洲气候格局的变化密切相关,同时也和青藏高原和副特提斯海的退却有一定的关系[41]。

分布于黄土高原的时间尺度长达 22 Ma 的红黏土在物理、化学、沉积特性上和第四纪黄土基本一模一样,也即长达 22 Ma 的红黏土也是风成成因的,而目前并没有发现范围较大的更早的风成沉积物的出现,由于风成沉积物的形成需要一定的干旱源区,所以郭正堂认为现代亚洲荒漠化起源于 22 Ma,也即风成沉积物红黏土的出现时间[17]。

黄土-古土壤作为一种风成沉积物,是气候和构造作用下的结果,其就像 DNA 片段一样,蕴含着过去气候变化的信息,对黄土-古土壤的深度解读将有助于我们理解过去气候变化的历史及其机制,并指导合理应对未来的气候变化。

4. 结论

通过对黄土研究的总结,我们得出以下结论:

(1) 中国的黄土主要分布在黄土高原,是风成沉积的产物,其中最典型的是第四纪的黄土沉积。而中新世和上新世的红土和红黏土也属于风成沉积,和黄土一样,只是形成时的气候较为暖湿而已。

(2) 第四纪黄土地层按照时代关系从老到新可以分为午城黄土、离石黄土、马兰黄土和坡头黄土。另外,第四纪黄土中发育有 37 层黄土-古土壤旋回,分别对应着 37 次的气候冷暖波动。

(3) 黄土是气候作用下的产物,目前认为东亚季风起源于中新世早期,随后存在着季风强度的多次变化,而青藏高原的隆升对季风的形成也有重要的贡献。

作为三大天书之一的黄土不仅代表着我国广袤的黄土高原,更是代表着过去气候变化的历史。尽管前人已经做了很多的工作,但黄土中蕴含的生态-气候信息仍旧等待着科学家去发现、去探索,这将为我国生态系统的可持续发展奠定坚实的基础。

基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2021-26),中央高校基本科研业务费资助项目(300102270503)。

参考文献

- [1] Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., *et al.* (2001) Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, **292**, 686-693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>
- [2] 邓成龙,刘青松,潘永信,等.中国黄土环境磁学[J].第四纪研究,2007,27(2):193-209.
- [3] Pye, K. (1995) The Nature, Origin and Accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews*, **14**, 653-667.

- [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0277-3791(95)00047-X)
- [4] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-460.
- [5] 郝青振, 郭正堂. 1.2 Ma 以来黄土 - 古土壤序列风化成壤强度的定量化研究与东亚夏季风演化[J]. 中国科学: 地球科学, 2001, 31(6): 520-528.
- [6] Taylor, S.R., McLennan, S.M. and McCulloch, M.T. (1983) Geochemistry of Loess, Continental Crustal Composition and Crustal Model Ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47**, 1897-1905.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90206-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90206-5)
- [7] 文启忠, 刁桂仪, 潘景瑜, 等. 黄土高原黄土的平均化学成分与地壳克拉克值的类比[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 225-231.
- [8] Prins, M.A. and Vriend, M. (2007) Glacial and Interglacial Eolian Dust Dispersal Patterns across the Chinese Loess Plateau Inferred from Decomposed Loess Grain-size Records. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **8**, Article No. Q07Q05. <https://doi.org/10.1029/2006GC001563>
- [9] Pye, K. (1992) Aeolian Dust and Dust Deposits. In: Yelles, M., Ed., *Encyclopedia of Earth System Science*, Vol. 1, Academic Press, London, 35-42.
- [10] Prins, M.A., Vriend, M., Nugteren, G., et al. (2007) Late Quaternary Aeolian Dust Input Variability on the Chinese Loess Plateau: Inferences from Unmixing of Loess Grain-Size Records. *Quaternary Science Reviews*, **26**, 230-242.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.07.002>
- [11] Qin, X.G. Cai, B. and Liu, T. (2005) Loess Record of the Aerodynamic Environment in the East Asia Monsoon Area since 60,000 Years before Present. *Journal of Geophysical Research*, **110**, Article No. B01204.
<https://doi.org/10.1029/2004JB003131>
- [12] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比——红粘土风成成因的新证据[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 226-232.
- [13] 彭淑贞, 郭正堂. 风尘堆积中 SiO₂/Al₂O₃ 值与粒度的关系及其对东亚冬季风的指示意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2001(B12): 209-214.
- [14] 丁仲礼, 刘东生. 中国黄土研究新进展(一)黄土地层[J]. 第四纪研究, 1989, 9(1): 24-35.
- [15] Guo, Z.T., Ruddiman, W.F., Hao, Q.Z., 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>
- [16] An, Z.S., Kutzbach, J.E., Prell, W.L., et al. (2001) Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene Times. *Nature*, **411**, 62-66. <https://doi.org/10.1038/35075035>
- [17] 郭正堂. 黄土高原见证季风和荒漠的由来[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(4): 421-437.
<https://doi.org/10.1360/N072017-00037>
- [18] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1998, 42(1): 66-69.
<https://doi.org/10.1360/csb1997-42-1-66>
- [19] Yang, S. and Ding, Z. (2008) Advance-Retreat History of the East-Asian Summer Monsoon Rainfall Belt over Northern China during the Last Two Glacial-Interglacial Cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, **274**, 499-510.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.08.001>
- [20] Marković, S.B., Stevens, T., Kukla, G.J., et al. (2015) Danube Loess Stratigraphy—Towards a Pan-European Loess Stratigraphic Model. *Earth-Science Reviews*, **148**, 228-258. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.06.005>
- [21] Schellenberger, A.G., Heller, F. and Veit, H. (2003) Magnetostratigraphy and Magnetic Susceptibility of the Las Carreras Loess-Paleosol Sequence in Valle de Tafí, Tucumán, NW-Argentina. *Quaternary International*, **106-107**, 159-167.
[https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00170-2)
- [22] Okhravi, R. and Amini, A. (2001) Characteristics and Provenance of the Loess Deposits of the Gharatikan Watershed in Northeast Iran. *Global & Planetary Change*, **28**, 11-22. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00061-8)
- [23] Dodonov, A.E. and Baiguzina, L.L. (1995) Loess Stratigraphy of Central Asia: Palaeoclimatic and Palaeoenvironmental Aspects. *Quaternary Science Reviews*, **14**, 707-720. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(95\)00054-2](https://doi.org/10.1016/0277-3791(95)00054-2)
- [24] Haase, D., Fink, J., Haase, G., et al. (2007) Loess in Europe—Its Spatial Distribution Based on a European Loess Map, Scale 1:2,500,000. *Quaternary Science Reviews*, **26**, 1301-1312. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.02.003>
- [25] Bettis, E.A., Muhs, D.R., Roberts, H.M., et al. (2003) Last Glacial Loess in the Conterminous USA. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 1907-1946. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00169-0](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00169-0)
- [26] Richthofen, B.F. (1882) II.—On the Mode of Origin of the Loess. *Geological Magazine*, **9**, 293-305.
<https://doi.org/10.1017/S001675680017164X>
- [27] Chamberlin, T.C. (1897) Supplementary Hypothesis Respecting the Origin of the Loess of the Mississippi Valley. *The*

- Journal of Geology*, **5**, 795-802. <https://doi.org/10.1086/607964>
- [28] Obruchev, V.A. (1911) The Question of the Origin of Loess—In Defence of the Eolian Hypothesis. *Izvästiya Tomska-go Tekhnologicheskago Instituta*, **33**, Article No. 38.
- [29] Richthofen, F. (1877) China. Vol. 1, Verlag von Dietrich Reimer, Berlin, 1-758.
- [30] 刘东生. 第四纪环境[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-300.
- [31] Friedrich, H. and Liu, T. (1984) Magnetism of Chinese Loess Deposits. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **77**, 125-141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01928.x>
- [32] Kukla, G. and An, Z. (1987) Loess Stratigraphy in Central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **72**, 203-225. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90143-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90143-0)
- [33] Ding, Z.L., Yang, S.L., Hou, S.S., *et al.* (2001) Magnetostratigraphy and Sedimentology of the Jingchuan Red Clay Section and Correlation of the Tertiary Eolian Red Clay Sediments of the Chinese Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 6399-6407. <https://doi.org/10.1029/2000JB900445>
- [34] Liu, T., Ding, Z. and Rutter, N. (1999) Comparison of Milankovitch Periods between Continental Loess and Deep Sea Records over the Last 2.5 Ma. *Quaternary Science Reviews*, **18**, 1205-1212. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(98\)00110-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(98)00110-3)
- [35] 杜青松. 黄土高原黄土-古土壤序列古气候代用指标综述[J]. 西北地质, 2011, 44(2):177-185.
- [36] Ding, Z.L., Sun, J.M., Liu, T.S., *et al.* (1998) Wind-Blown Origin of the Pliocene Red Clay Formation in the Central Loess Plateau, China. *Earth and Planetary Science Letters*, **161**, 135-143. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00145-9)
- [37] 韩家懋, 姜文英, 刘东生, 等. 黄土碳酸盐中古气候变化的同位素记录[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1996(5): 399-404.
- [38] 陈骏, 汪永进, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义[J]. 第四纪研究, 1999, 19(4): 350-356.
- [39] 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, 18(3): 194-204.
- [40] Fitzsimmons, K.E., Marković, S.B. and Hambach, U. (2012) Pleistocene Environmental Dynamics Recorded in the Loess of the Middle and Lower Danube Basin. *Quaternary Science Reviews*, **41**, 104-118. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.03.002>
- [41] Zhang, Z.S., Wang, H., Guo, Z.T., *et al.* (2007) What Triggers the Transition of Palaeoenvironmental Patterns in China, the Tibetan Plateau Uplift or the Paratethys Sea Retreat? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **245**, 317-331. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.08.003>
- [42] 汪品先. 全球季风的地质演变[J]. 科学通报, 2009, 54(5): 535-556. <https://doi.org/10.1360/csb2009-54-5-535>