

文章编号 1001-7410(2005)04-443-06

黄土与地球系统

——李希霍芬对黄土研究的贡献及对地球系统科学研究的现实意义

郭正堂^{①②} 刘东生^②

(^①中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室,西安 710075;^②中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要 李希霍芬是 19 世纪德国著名的地质学家,对欧洲和中国黄土的研究工作,以及后来的黄土研究有着深刻影响,其学术思想在地球系统科学研究的时代依然有重要的现实意义。文章简要回顾了李希霍芬对黄土研究的贡献,并探讨这些贡献与黄土研究在地球系统科学研究中的现实意义。从李希霍芬时代到今天,黄土作为全球宝贵的地球系统演化的历史记录,在揭示地球岩石圈、水圈、大气圈、冰冻圈、生物圈及宇宙事件对地球系统的影响发挥了重要作用,并在未来地球系统科学研究时代有旺盛的生命力。

关键词 黄土 地球系统科学 李希霍芬

中图分类号 P941.74, K81 **文献标识码** A

1988 年,美国国家航空航天局(NASA)顾问委员会出版了《地球系统科学》(Earth System Science)一书^[1],集数百位科学家的智慧,较清楚地论述了地球系统和地球系统科学的概念,强调把地球看作一个“整体系统”,研究其不同圈层相互作用的物理学、化学和生物学过程与机制,并把人类活动列为与诸多自然因素同等重要的地球演化营力。虽然地球系统科学概念的系统阐述在 NASA 的著作中较早出现,但严格地讲,它是科学发展的必然产物。其核心思想是在 20 世纪的科学发展和技术进步中逐步形成的,体现了学术界科学理念的变革,标志着人类对地球认知的过程进入了一个新的阶段。

地球系统科学的核心强调从整体地球系统的视野对地球各圈层相互作用的过程和机理的研究^[1]。实际上,圈层相互作用的思想萌芽在 19 世纪末和 20 世纪初就已相当明确,在后来地球与行星科学领域一系列重要进展中逐步系统化的。Davis^[2]的地貌学夷平面理论十分清晰地阐述了地球表层系统与水圈和大气圈的相互作用。在 20 世纪 20 年代,就有用壳下对流机制解释大陆漂移和新洋盆形成的实例^[3]。代表 20 世纪地球科学革命的板块理论,实际上是从全球的视野,较成功地解释了大洋岩石圈的宏观运动规律^[4];但它在解释大陆岩石圈演化的过程中,遇到的一系列困难使科学界意识到,岩石圈的

演化与地幔和地核的演化密切相关^[5],即地球的固体圈层是相互作用的。后来地球环境科学领域的一系列进步对地球系统科学思想的产生和发展的作用值得格外重视。不少解释全球重大环境变化的假说^[6-8]将新生代许多重大的环境事件和岩石圈构造运动密切相关,从而把岩石圈、海洋(水圈)、冰冻圈、大气圈乃至生物圈的演化紧密联系起来。这些认识使科学界深刻地意识到,要真正理解地球系统不同于子单元的运作,必须从整体系统的视野来研究地球。20 世纪技术的快速进步也使科学界加深了这种认识,并使从整体系统角度对地球的观测成为可能。

地球系统科学的产生同时也是世界范围的社会需求的产物。这种需求最突出的体现于人类面临的环境问题。在这种背景下,从 20 世纪 80 年代开始,逐步诞生了针对环境问题的一系列大型国际研究计划,如国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)以及生物多样性计划(DIVERSITAS)等。这 4 个研究计划后来联合成立的地球系统科学联盟(ESSP),成为国际地球系统科学研究组织方式上的一个成功范例。

在我们今天大力促进地球系统科学的时候,恐怕为数不多的人能想到德国科学家李希霍芬

(F. von Richthofen)。他是 19 世纪著名的地质学家,对欧洲和我国黄土的研究做出过杰出的贡献。他的诸多认识对后来把黄土研究与地球不同圈层演化过程相联系的学术思想有重要的基础作用。本文简要回顾李希霍芬对黄土研究的贡献,并探讨这些贡献与黄土研究在地球系统科学研究中的现实意义。

1 李希霍芬与黄土研究

欧洲莱茵河谷和法国北部的黄土研究比较早,西文的黄土(loess)最早就是从德文演化过来的。但对黄土成因的认识,却经历了阶段性的发展过程。18 世纪末到 19 世纪初,“灾变论”思想在地学界广泛传播的时候,多数学者认为黄土是洪积期的产物^[9-13]。尔后,莱伊尔(C. Lyell)将今论古的现实主义研究方法给黄土研究带来新的思想,注重实际材料比较的研究逐步增加,黄土的研究也从西欧扩展到东欧、北美和中国等地。在 19 世纪中叶,对黄土成因的认识以水成说占主导地位,其中包括冲积、洪积、湖积、海积和冰水成因等说法^[9-14]。莱伊尔在 1833 年出版的《地质学原理》(The Principles of Geology)一书中,就认为黄土是冲积成因的^[10]。后来,A. 布朗关于黄土中软体动物化石的研究为认识黄土的形成环境起到了十分重要的作用,他们发现欧洲不少黄土中的软体动物化石以早生种属为主,只有极少数可能是水生的,实际上反映了黄土是一种旱地沉积物^[11]。

李希霍芬对黄土研究的最大贡献之一就是黄土风成说的提出。他在 1868~1872 年期间先后 7 次来中国考察,亲身经历了我国北方的尘暴过程,发现我国北方的黄土与莱茵河谷的黄土十分相似,分布于不同高度和不同地形上,其中早生软体动物化石零散分布,壳体保存完好,表明未受水流改造,于是在 1877 年出版的《中国》(China)一书^[12]中明确提出黄土是大气沉积物,认为黄土是风吹扬起来的沙尘由风和雨水沉降在干旱草原植被上或内陆盐沼化湖盆上形成的,并把黄土分为旱地黄土和湖沼黄土。他同时提出黄土高原是内陆湖盆被黄土充填形成的。

李希霍芬提出的黄土风成说,被俄国学者 V. A. 奥勃鲁契夫进一步发展。他通过对中亚和中国北方等地的观测,提出了原生黄土(典型黄土)和次生黄土的概念,认为次生黄土是典型黄土经水流再搬运的产物,与原生黄土有密切的关系^[13]。奥勃鲁

契夫进一步提出,中国北方的黄土是沙漠黄土(即热黄土),而西欧和中欧黄土与冰川作用有密切联系,属“冷黄土”,并强调反气旋作用对黄土物质的搬运和沉积的作用^[13]。

值得指出的是,在 20 世纪 50 年代以前,中国黄土的概念一般仅限于晚更新世的马兰黄土。尔后对黄土的分布、成因、组成、岩性和生物地层的系统研究,将风尘堆积的概念从当时晚更新世的马兰黄土扩展到整个第四纪^[14-17]。后来对三趾马红粘土的重新认识^[18,19],将风尘堆积的认识扩展到约 8Ma。近年来对中新世黄土的研究^[20]进一步将风尘堆积的认识扩展到 22Ma。

李希霍芬对黄土研究的另一贡献是编制了中亚细亚境内黄土与沙漠分布略图^[12]。估计了中国黄土的分布面积,约为 630 000km²。这些工作的主要目的是进一步阐述他的黄土风成说,但把黄土与沙漠密切联系起来,并对阐明中国黄土是一个巨大的地质建造做出了贡献。

李希霍芬的上述贡献对后来世界范围内的黄土研究有着深刻的影响。黄土风成说的提出,无疑把岩石圈表层的演化和大气圈的演化密切联系起来。他所揭示的黄土与沙漠的关系,也把黄土与地球环境系统中的干旱环境相联系。这些都对今天地球系统科学研究有十分深刻的现实意义,因为地球系统科学的核心思想正是揭示地球不同圈层的相互作用过程。

2 黄土与地球系统演化

回顾黄土研究的历史可以发现,从李希霍芬时代直到今天,黄土研究所取得的许多认识,都是在努力揭示地球系统不同圈层相互作用的过程。黄土研究不仅为揭示岩石圈、大气圈、水圈和生物圈演化及其相互作用过程提供了丰富的信息,而且也是地球系统演化外动力、乃至地球深部的一系列过程的信息库。从这个意义上讲,全球范围的黄土研究,过去对地球系统科学思想的产生是发挥过重要作用的;而黄土在未来的地球系统科学研究中更是有着不可替代的优势。

2.1 黄土与岩石圈演化

黄土物质本身来自岩石圈,因而记录了地球岩石圈演化的诸多信息。李希霍芬在《中国》^[12]一书中,就提及高山地带岩石的风化产物可能参与了黄土的形成过程。今天学术界已清晰地认识到,岩石

圈的剥蚀对干旱、半干旱地区河流堆积提供了重要物源,后者又与荒漠地区的风沙物质有密切的亲缘关系。而风沙的撞击作用,正是形成黄土的粉砂物质产生的重要过程之一^[21]。因此,黄土稀土元素等特征与上地壳平均成分的一致性^[22],也反映了黄土物质是上地壳物质经复杂的地质过程充分混合后的产物,是风尘堆积具备的特征之一。

黄土研究为揭示岩石圈构造演化提供了丰富的信息。第四纪黄土的研究为青藏高原的新近隆升过程提供了重要的证据^[17]。上新世的风成红粘土则记录了青藏高原在该时期的隆升过程^[18,23,24],而我国中新世的黄土-古土壤序列的形成与喜马拉雅运动、副特提斯海关闭等有密切关系^[20]。这些岩石圈演化过程对黄土堆积的影响的途径之一是对大气环流的改变所造成的,实际上是岩石圈与大气圈相互作用的结果。

2.2 黄土与大气圈演化

由李希霍芬提出的,经奥勃鲁契夫等科学家进一步发展的黄土风成说,实际上把黄土堆积与大气圈的演化紧密联系起来。这个科学认识上的突破,为后来用黄土堆积揭示大气环流的演化历史奠定了十分重要的基础。黄土作为区域和全球气候变化的重要记录,与其他记录相比,其不可替代性正体现于它是大气环流的产物^[17]。我国北方的黄土主要是冬季风环流把风尘从荒漠中搬运到黄土高原堆积,而其中大量的古土壤的发育与夏季风携带的来自低纬度的夏季风环流密切相关^[17,25,26]。因此,由黄土和古土壤交替组成的黄土-古土壤序列记录了亚洲冬、夏季风环流演化及其相互作用的历史^[25,26]。季风环境下形成的黄土-古土壤序列与非季风环境下形成的序列相比,最突出的标志就是由两支大气环流同时控制的成壤过程和风尘堆积过程的同时进行,从而形成所谓“加积型古土壤”^[27]。而非季节性环流控制地区的古土壤代表了一种沉积间断。中亚地区的黄土-古土壤序列^[28]反映了冬季北极冷气团和夏季亚速尔高压形成的偏西气流的演化及相互作用过程。冬季该区受北极冷气团影响,盛行东北冷气流,带来一定的水汽,降水主要出现在冬春季节,对其中的古土壤的形成有重要影响;夏季该区位于亚速尔高压东南部,因而地面盛行西北风,经常存在下沉逆温,控制空气垂直运动,难以降雨,因而夏季干燥少雨^[29]。从这个意义上讲,中亚地区的黄土-古土壤序列反映的也是季节性环流的演化,与

我国的季风环流有一定的相似之处。在气候学上,只把大范围的盛行风向随季节变化的现象称为季风^[29],而中亚的气流虽然也随季节变化,但因为范围较小而不能称为季风。已有研究表明,阿拉伯海的风尘堆积反映了印度洋季风演化的历史^[30],而北太平洋地区的风尘堆积则记录了北半球西风环流的演化历史^[31]。因此,地球上不同地区的黄土或与黄土密切相关的风尘堆积,为研究不同大气环流分支的演化历史提供了重要的证据。

2.3 黄土与水圈和冰冻圈演化

海洋作为地球水圈最主要的组成部分,其演化对全球气候系统有深刻的影响。虽然海洋对大气圈演化的重要性早已被学术界所认识,但海-气相互作用的机理和过程依然是地球系统科学研究的重要范畴之一。

在第四纪全球环境变化过程中,水圈和冰冻圈的物质交换异常活跃。我国的黄土-古土壤序列记录了水圈和冰冻圈演化的重要信息。20世纪50年代末的研究^[32]认识到黄土堆积代表干冷的环境,而其中的古土壤代表相对暖湿环境,并发表了包含多层黄土和古土壤的环境记录,从而从陆相记录的角度提出了第四纪环境变迁的多旋回概念,对第四纪“多次冰期”理论的发展产生过深刻的影响;从70年代起,磁性地层学、同位素年代学应用于黄土研究,逐步获得了中国黄土-古土壤序列独立的时间标尺^[33,34];到80年代初提出了黄土与深海氧同位素地层的对比方案^[35],成为后来黄土古气候学和古全球变化研究的重要起点。黄土地层与深海氧同位素地层的一致性^[35]及其阶段性的耦合关系^[36],实际上把黄土记录的环境信息与水圈和冰冻圈的演化紧密地联系起来,表明黄土中包含有全球海面变化、全球冰量变化等重要信息。黄土中记录的极端气候事件也与海洋环流的变化密切相关^[37]。在未来地球系统科学研究的时代,海陆对比和海陆过程的相互作用依然是科学研究的重要内容之一。黄土作为全球变化的重要记录,其中仍然有大量关于水圈演化的信息有待挖掘。

2.4 黄土与生物圈演化

黄土作为2200万年全球变化的重要记录,其中包含的各类生物化石和生物遗存无一不反映地球生物圈的演化历史。虽然黄土中的孢粉研究有一定困难,但随着技术的进步,为研究较大尺度的生态变

化提供了重要信息^[38]。植物硅酸体^[39,40]和陆生软体动物^[41,42]的研究在很大程度上弥补了孢粉研究的困难。典型黄土中包含大量小哺乳动物化石^[17,20],不仅为黄土本身提供了很好的地层年代学框架,而且为理解生物进化及其与环境的关系提供了理想材料。近年来,随着同位素理论和技术的进步,黄土物质同位素组成的研究,也为恢复不同光合作用植被的演化历史提供了有力的工具^[43,44]。

我国北方的黄土区自很早就是人类生存繁衍的重要地区,形成“黄土石器工业”^[45],也是中华文明的发祥地。黄土所记录的详细的环境变化历史及其中丰富的考古遗存,为研究环境演化对人类起源、演化迁徙,人类与环境的相互作用提供了理想材料,是我国地球系统科学研究的一个重要切入点。

2.5 黄土与地球系统外动力及地球深部动力

20世纪地球科学的重要进展之一就是认识到天体运动对地球演化有重要影响。古气候的天文理论(也称米兰科维奇理论)^[46]认为,地球轨道的变化是气候系统在万年-数十万年尺度上周期性变化的根本原因。气候变化还存在11~1500年的各种太阳活动周期^[47]。地磁场对宇宙射线的作用,就有可能造成气候变化和生物的变化^[48]。地质历史^[49]、甚至人类历史上的一些重大环境事件可能是宇宙事件的结果。

我国黄土清晰地记录了地球轨道变化对气候系统的影响,成为研究地球系统演化内外动力及相互作用的理想材料。第四纪黄土中早期记录了以地轴斜度的准4万年周期变化,到中更新世后期转变为偏心率10万年周期为主的变化^[50]。上新世期间,东亚气候变化以地轴斜度的准4万年周期为主^[51],而中新世的黄土-古土壤序列也同样记录了轨道时间尺度内的气候变化^[20],反映了外动力对地球系统的影响。对黄土中宇宙核素^[52]的研究,不仅能够揭示如太阳活动等外动力对气候系统的影响,而且可能与地磁场的变化有密切关系^[48],而后者可能和地核的运动有关^[53]。对我国黄土记录的地磁极性转换过程的研究^[54]也能够为揭示地球深部过程提供重要的信息。

3 结语

如果从1868年李希霍芬到中国的第一次考察算起,至今已有138年的历史。然而,他在黄土研究早期的贡献,对今天开展地球系统科学研究的时代

依然有十分重要的现实意义。黄土作为地球上一个巨大的地质建造,为人类认识地球环境变化的历史提供了十分丰富的信息。

世界各国的地球系统科学研究规划中,将地球系统的历史列为重点研究内容之一。黄土研究不仅为认识地球系统演化发挥了重要作用,而且在未来地球系统科学研究中依然有不可替代的优势。我国北方的黄土是与深海沉积和极地冰芯相并列的研究全球环境变化的三大支柱之一,它不仅是2200万年来地球环境系统演化的重要信息载体,而且记录了地球岩石圈、大气圈、水圈和生物圈演化及其相互作用的过程。同时,黄土中包含了地球系统外动力和地球深部动力的诸多信息。这些正是地球系统科学研究的核心内容。今天我们在黄土中所认识到的地球系统演化信息仅仅是冰山一角。随着相关学科理论的发展和学科的进一步交叉、技术的进步,黄土所提供的信息会越来越多,这正是黄土研究的生命力所在。

参考文献 (References)

- 1 NASA. Earth System Science: A Closer View. Washington D C: NASA, 1988. 1 ~ 208
- 2 Davis W M. The geographical cycle. *Geographical Journal*, 1899, (14): 481 ~ 504
- 3 Holmes A. Radioactivity and Earth movements. *Translation Geological Society Glasgow*, 1928, 18: 559 ~ 606
- 4 中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组. 地球科学: 世纪之交的回顾与展望. 济南: 山东教育出版社, 2002. 2 ~ 4
Division of Earth Science, Chinese Academy of Sciences. Earth Science: A Review and Prospect at the Turn of the Century. Jinan: Shandong Education Press, 2000. 2 ~ 4
- 5 Tackley P J. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory. *Science*, 2000, 288: 2002 ~ 2007
- 6 Ruddiman W F, Prell W L, Raymo M E. Late Cenozoic uplift in Southern Asia and the American West: Rational for general circulation modeling experiments. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 18379 ~ 18391
- 7 Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. The influence of Late Cenozoic mountain building on oceanic geochemical cycle. *Geology*, 1988, 16: 649 ~ 653
- 8 Ramstein G, Fluteau F D, Besse J *et al.* Effect of orogeny, plate motion and land-sea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years. *Nature*, 1997, 386: 788 ~ 795
- 9 Pumpelly R. Geological researches in China, Mongolia and Japan during the year 1862 ~ 1865. *Smithsonian Contributions to Knowledge*, 1866, 202: 38 ~ 39
- 10 Lyell C. The Principles of Geology (Vol. 3). London: John Murray, 1833. 1 ~ 398

- 11 Braun A. Löss Neues Jahrbuch für Min, Geogn. *Geology und Peterfaktenkunde*, 1847, 1: 49 ~ 53
- 12 Richthofen F. China (Vol. 1). Berlin: Verlag von Dietrich Reimer, 1877. 1 ~ 758
- 13 奥勃鲁契夫 V A. 黄土的成因问题. 砂与黄土问题(乐铸和刘东生等译). 北京:科学出版社, 1958. 101 ~ 144
Obruchev V A. Problem of Origin in Loess. Problem Between Sand and Loess (translation by Le Z, Liu T S et al). Beijing: Science Press, 1958. 101 ~ 144
- 14 刘东生等著. 黄河中游的黄土. 北京:科学出版社, 1964. 1 ~ 234
Liu Tunghsheng et al. The Loess in the Middle Reach of the Yellow River. Beijing: Science Press, 1964. 1 ~ 234
- 15 刘东生等著. 中国的黄土堆积. 北京:科学出版社, 1965. 1 ~ 244
Liu Tunghsheng et al. The Loess Deposits in China. Beijing: Science Press, 1965. 1 ~ 244
- 16 刘东生等著. 黄土的物质成分和结构. 北京:科学出版社, 1966. 1 ~ 132
Liu Tunghsheng et al. Composition and Texture of Loess. Beijing: Science Press, 1966. 1 ~ 132
- 17 刘东生等著. 黄土与环境. 北京:科学出版社, 1985. 1 ~ 481
Liu Tunghsheng et al. Loess and the Environment. Beijing: Science Press, 1985. 1 ~ 481
- 18 An Z S, Kutzbach J E, Prell W L et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2001, **411**: 62 ~ 66
- 19 Ding Z L, Yang S L, Hou S S et al. Magnetostratigraphy and sedimentology of Jingchuan red clay section and correlation of the Tertiary eolian red clay sediments of the Chinese Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**: 6 399 ~ 6 407
- 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. *Nature*, 2002, **416**: 159 ~ 163
- 21 Whalley W B, Marshall J R, Smith B J. Origin of desert loess from some experimental observations. *Nature*, 1982, **300**: 433 ~ 435
- 22 Jahn B, Gallet S, Han J M. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China; Eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140ka. *Chemical Geology*, 2001, **178**(1 ~ 4): 71 ~ 94
- 23 Liu T S, Guo Z T. Geological environments in China and global changes. In: An Z S ed. Selective Works of Liu Tunghsheng. Beijing: Science Press, 1997. 193 ~ 202
- 24 Guo Z T, Peng S Z, Hao Q Z et al. Late Miocene-Pliocene development of Asian aridification as recorded in the red-earth formation in Northern China. *Global and Planetary Change*, 2004, **41**(3 ~ 4): 135 ~ 145
- 25 An Z S, Kukla G J, Porter S C et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 130,000 years. *Quaternary Research*, 1991, **36**(1): 29 ~ 36
- 26 Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon. *Annual Review Earth Planetary Science*, 1998, **26**: 111 ~ 145
- 27 朱显谟. 我国黄土性沉积物中的古土壤. 中国第四纪研究, 1965, **4**(1): 9 ~ 19
- Zhu Xianmo. Palesols in loessic sediments of China. *Quaternaria Sinica*, 1965, **4**(1): 9 ~ 19
- 28 Shackleton N J, An Z S, Dodonov A E et al. Accumulation rate of loess in Tadjikistan and China; Relationship with global ice volume cycles. *Quaternary Proceedings*, 1995, **4**: 1 ~ 6
- 29 周淑贞主编. 气象学与气候学. 北京:高等教育出版社, 2000. 179 ~ 180
Zhou Shuzhen ed. Meteorology and Climatology. Beijing: Higher Education Press, 2000. 179 ~ 180
- 30 Clemens S, Prell W, Murray D et al. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 1991, **353**: 720 ~ 725
- 31 Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea; The geologic history of wind. *Reviews of Geophysics*, 1994, **32**: 159 ~ 195
- 32 Liu T S, Wang T M, Wang K L et al. Die Verbreitung des Löss * β in den Provinzen Shansi und Shensi (Gebiete des mittleren Hoangho, China). *Geologie*, 1959, **8**(2): 123 ~ 130
- 33 刘东生, 安芷生. 洛川北韩寨黄土磁性地层学的初步研究. 地球化学, 1984, (2): 134 ~ 137
Liu Tunghsheng, An Zhisheng. Paleomagnetic research of the Beihan village loess section at Luochun. *Geochemica*, 1984, (2): 134 ~ 137
- 34 Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature*, 1982, **300**: 431 ~ 433
- 35 刘东生, 袁宝印. 第四纪气候波动形式——黄土和深海沉积记录的对比. 见:中国科学院地质研究所编. 中国科学院地质研究所地质科研成果选集(第一集). 北京:文物出版社, 1982. 113 ~ 121
Liu Tunghsheng, Yuan Baoyin. Quaternary climatic fluctuation; A correlation of records in loess with that of the Deep Sea Core V₂₈₋₂₃₈. In: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences ed. Research on Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences (1). Beijing: Culture Relics Publishing House, 1982. 113 ~ 121
- 36 Liu T S, Ding Z L. Stepwise coupling of monsoon circulations to global ice volume variations during Late Cenozoic. *Global and Planetary Change*, 1993, **7**(1 ~ 3): 119 ~ 130
- 37 Guo Z T, Liu T S, Fedoroff N et al. Climate extremes in loess of China coupled with the strength of deep-water formation in the North Atlantic. *Global and Planetary Change*, 1998, **18**(3 ~ 4): 113 ~ 128
- 38 Sun X J, Song C Q, Wang F Y et al. Vegetation history of the Loess Plateau of China during the last 100,000 years based on pollen data. *Quaternary International*, 1997, **37**: 25 ~ 36
- 39 吕厚远, 刘东生, 吴乃琴等. 末次间冰期以来黄土高原南部植被演变的植物硅酸体记录. 第四纪研究, 1999, **19**(4): 336 ~ 349
Lü Houyuan, Liu Tunghsheng, Wu Naiqin et al. Phytolith record of vegetation succession in the southern Loess Plateau since Late Pleistocene. *Quaternary Sciences*, 1999, **19**(4): 336 ~ 349
- 40 Lu H Y, Liu K. Morphological variations of lobate phytoliths from grasses in China and the southeastern USA. *Diversity and Distributions*, 2003, **9**(1): 73 ~ 87
- 41 Wu N Q, Rousseau D D, Liu T S et al. Orbital forcing of terrestrial mollusks and climatic changes from the Loess Plateau of China during the past 350ka. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D17): 20 045 ~ 20 054

- 42 吴乃琴, 刘秀平, 顾兆炎等. 末次盛冰期黄土高原蜗牛化石记录的气候快速变化及其影响机制. *第四纪研究*, 2002, **22**(3): 283 ~ 291
Wu Naiqin, Liu Xiuping, Gu Zhaoyan *et al.* Rapid climate variability recorded by mollusk species on the Loess Plateau during the last glacial maximum. *Quaternary Sciences*, 2002, **22**(3): 283 ~ 291
- 43 顾兆炎, 刘 强, 许 冰等. 气候变化对黄土高原末次盛冰期以来的 C_3/C_4 植物相对丰度的控制. *科学通报*, 2003, **48**(13): 1 458 ~ 1 464
Gu Zhaoyan, Liu Qiang, Xu Bin *et al.* Climate as the dominant control on C_3 and C_4 plant abundance in the Loess Plateau: Organic carbon isotope evidence from the last glacial-interglacial loess-soil sequences. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(12): 1 271 ~ 1 276
- 44 刘卫国, 宁有丰, 安芷生等. 黄土高原现代土壤和古土壤有机碳同位素对植被的响应. *中国科学(D 辑)*, 2002, **32**(10): 830 ~ 836
Liu Weiguo, Ning Youfeng, An Zhisheng *et al.* Carbon isotopic composition of modern soil and paleosol as a response to vegetation change on the Chinese Loess Plateau. *Science in China (Series D)*, 2002, **32**(10): 830 ~ 836
- 45 刘东生, 孙继敏, 吴文祥. 中国黄土研究的历史、现状和未来——一次事实与故事相结合的讨论. *第四纪研究*, 2001, **21**(3): 185 ~ 207
Liu Tungsheng, Sun Jimin, Wu Wenxiang. Past, present and future of the Chinese loess research: A discussion on the reality of facts and myth. *Quaternary Sciences*, 2001, **21**(3): 185 ~ 207
- 46 Milankovitch M M. *Kanon der Erdbastrahlung und seine Anwendung auf des Eiszeitenproblem*. Belgrade: Royal Serbian Sciences, special publish 132, section of Mathematical and Natural Sciences, 1941, **33**: 633 ("Canon of Insolation and the Ice Age Problem", English Translation by Israel Program for the U. S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington D C, 1969, and by Zavod za Udzbenike I nastavna Sredstva in cooperation with Muzej nauke I tehnike srpske akademije nauka I umetnosti, Beograd, 1998)
- 47 Bond G, Kromer B, Beer J *et al.* Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, **294**: 2 130 ~ 2 136
- 48 Guyodo Y, Valet J P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr. *Nature*, 1999, **399**: 249 ~ 252
- 49 Alvarez W, Alvarez W M, Asaro F *et al.* Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 1980, **208**: 1 095 ~ 1 108
- 50 Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W *et al.* Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quaternary Science Reviews*, 1994, **13**(1): 39 ~ 70
- 51 Hao Q Z, Guo Z T. Magnetostratigraphy of a Late Miocene-Pliocene loess-soil sequence in the western Loess Plateau in China. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**, L09209, doi: 10.1029/2003GL019392
- 52 Shen C D, Beer J, Liu T S *et al.* ^{10}Be in Chinese loess. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, **109**(1 ~ 2): 169 ~ 177
- 53 Buffett B A. Earth's core and the geodynamo. *Science*, 2000, **288**: 2 007 ~ 2 012
- 54 朱日祥, 郭 斌, 丁仲礼等. Gauss-Matuyama 极性转换期间地球磁场方向和强度变化特征. *地球物理学报*, 2000, **43**(5): 621 ~ 634
Zhu Rixiang, Guo Bin, Ding Zhongli *et al.* Gauss-Matuyama polarity transition obtained from a loess section at Weinan, North-central China. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, **43**(5): 621 ~ 634

LOESS AND EARTH SYSTEM

Guo Zhengtang^{①②} Liu Tungsheng^②

(^①State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075;

^②Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

F. von Richthofen was a famous geologist from Germany, having numerous contributed to the studies of loess in Europe and in China. His scientific knowledge have had significant impacts on the loess researches since then, and are still of values in the Earth System Science. From his epoch to date, loess has been considered a valuable record of the evolving Earth, and has provided numerous information about the changes of Earth's lithosphere, hydrosphere, atmosphere, cryosphere, biosphere and their interactions. It also documented the impact of astronomical and cosmic events on the Earth System. In the upcoming epoch of Earth System Science, loess is expected to significantly contributed to addressing the Earth System history.

Key words loess, Earth System Science, Richthofen