

新世纪亚洲风尘系统地球化学研究进展

陈 骏

表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093

摘 要: 简要评述了 20 世纪亚洲风尘沉积地球化学研究的主要成果, 总结了新世纪以来亚洲风尘沉积地球化学在研究内容、方法、时间尺度及年代学方面的主要进展。较详细概述了最近十余年风尘沉积物在环境与气候替代性指标研究方面获得的新成果, 并从矿物特征、元素地球化学、同位素和单矿物地球化学指标方面示踪风尘沉积物源研究进行了总结。指出亚洲风尘地球化学研究应在空间上从黄土-沙漠区向中亚内陆、西北太平洋扩展; 在时间上拓展到中新世以来的风尘沉积; 方法上应结合大气环流、地貌过程等, 进行综合分析, 并开拓新的测试手段。此外, 应加强现代风尘过程的研究。亚洲风尘与风尘沉积地球化学研究的目的是解决风尘的产生、搬运和沉积的地球化学过程与环境变迁。

关 键 词: 亚洲风尘; 地球化学; 气候指标; 源区示踪

中图分类号: P594⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)05-0433-14

Progress of Aeolian Sediments and Dust Geochemistry in Asia in the New Century

CHEN Jun

*The Ministry of key Laboratory of Surficial Geochemistry, Nanjing 210093, China;
School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

Abstract: This paper reviews the main achievements of aeolian sediments and dust geochemistry in Asia in the past century. The main progress was summarized in terms of research scope, methodologies, time scale and chronology in the past decade. The new perceptions of proxy indexes of dust deposition in recent 10 years were elaborated, studies of tracing dust sources with respect to mineral characteristics, elemental geochemistry, isotope chemistry and mono-mineral geochemistry was commented as well. It is concluded that the researches on the aeolian deposits and dust has extended from loess-desert area to inland of Central Asia and Northwest Pacific, and, from the Quaternary to the Neogene, with combining analyses of atmospheric circulation and landform process etc.. In addition, the modern dust process has been paid special attention by the investigators.

Key words: Asian dust; geochemistry; climatic proxy; provenance tracing

1 前 言

新世纪亚洲风尘系统的研究方兴未艾, 显示出这一领域的勃勃生机。亚洲风尘系统的形成、发展与新生代全球气候变化及青藏高原的隆升有密切的关系。风尘系统对研究亚洲内陆干旱化历史, 高纬和低纬气候系统的耦合, 陆-海-气的相互作用方面具有重要的科学意义。我国北方频发的沙尘暴天气, 也凸显了亚洲风尘系统研究的现实意义。

1.1 20 世纪风尘系统研究回顾

在过去的 20 世纪, 对风尘系统的研究取得了诸多成就。从李希霍芬最早提出黄土的风成说, 到新中国成立后, 成立专门的黄土考察队, 再到八十年代中期, 以刘东生为首的专家、学者完成《黄土与环境》专著, 至 20 世纪末形成对黄土沉积研究的持续热潮, 黄土研究成果可与深海和冰川沉积记录媲美。作为陆地上厚度大、基本连续的风尘沉积, 黄土较完整记录了第四纪以来环境变化的信息。古环境演化

的研究,最重要的是建立年代标尺。早期黄土的研究,主要通过岩石和生物地层^[1]、磁性地层^[2,3]、热释光^[4,5]和¹⁴C测年^[1]等方法建立年代标尺,后续还采用了轨道调谐^[6,7]、加速器质谱 AMS¹⁴C^[8]、模式内插等^[9,10],建立较精确的年代标尺。在黄土研究的代用指标方面,最为经典的是磁化率和粒度指标,平均粒径的变化指示了冬季风的盛衰,而磁化率的高低对应夏季风的强弱,后续研究揭示,石英粒度的变化可能更好指示冬季风的强度^[11]。碳酸盐含量、元素比值,如风化指数^[12]、Rb/Sr 比值^[13]等都是很好的环境演化代用指标。碳酸盐碳氧同位素的研究,建立了氧同位素与古温度、碳同位素与环境干燥度的关系^[14,15],以及有机质碳同位素与 C4 植物相对生物量的半定量关系^[16]。其它环境替代性指标的研究,包括矿物、古土壤微形态、生物化石等,进一步加深了古环境演化的认识。

黄土是风成物质较细的组分,而沙漠是较粗的组分,沙漠是黄土的直接物质来源。研究表明,沙漠的形成与全球变冷、青藏高原隆升、季风的形成和发展紧密相关。在过去的 20 世纪,完成了对我国各个沙漠的基础调查,掌握了各大沙漠的基本特征,探索了沙漠地表形态发育特征和风沙运动规律^[17,18]。在此基础上,针对当时的实际情况,调查了沙漠化严重的区域,探讨了其形成机制^[19]。通过沙漠沉积记录研究,揭示了沙漠区域晚更新世以来的环境演化^[20,21]。

风成物质中较细组分,可以随风扬起,在高空进行长距离输送。研究已发现,在北太平洋沉积物和格陵兰冰芯中有来自亚洲粉尘的物质(粒径总体 $<5\ \mu\text{m}$)。研究发现,北太平洋粉尘物质的高峰值并不与冰期对应,大洋粉尘与陆地干旱之间具有相当程度的非线性关系^[16]。从风尘的分布看,在北太平洋洋底 $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 存在一条贯穿大洋的富石英沉积带^[22],而这一纬度跟中国尘暴区的位置一致。在西北太平洋的柱样中,可以确定来自日本、中国黄土地区和北亚高纬地区的物质来源。从风场上看,亚洲大陆向北太平洋输入的风尘具有很强的季节性,2~6 月的输入量比其它季节高一个数量级。北太平洋风尘沉积的年通量并非连续等量累积,会受到短暂突发事件的影响。

1.2 近十年来亚洲风尘研究进展

进入新的世纪,亚洲风尘研究又不断取得新进展。研究范围进一步扩大,黄土与沙漠过渡带的研究反映了沙漠的进退,揭示了冬夏季风的强弱转换;沙漠沉积记录的研究,反映了不同气候时期沙漠的

活化与固定。同时,对不同区域黄土的研究,不仅反映了区域尺度环境的演变,也为揭示气候环境的耦合变化提供了依据。

研究方法上,从气候环境物理替代性指标为主向地球化学和生物指标转变,加强了生物地球化学指标和生物指标研究。粒度、磁化率、碳酸盐的含量等作为成熟的指标,在揭示环境的演变方面做出了贡献,但由于这些指标自身的局限性,使得从更深入的机理解释上出现困难,而地球化学和生物指标,能从更清晰的机理过程解释环境的变化。

研究的时间尺度上,对黄土下伏的红粘土展开了深入研究,不仅证实了红粘土的风成成因,而且把亚洲风尘产生的历史从 7 Ma 延伸到 22 Ma,通过对红粘土环境代用指标的研究,为认识东亚季风的形成、发展提供了进一步的证据。

在年代学方面,随着光释光(OSL)测年技术的快速发展和广泛应用,年代控制更加精确。高密度的光释光测年数据揭示了黄土、沙漠分布的中国北方古气候较为精确的变化,同时反映出黄土沉积在千年时间尺度存在间断^[23]。

2 环境变化的风尘沉积物替代性指标

黄土的风成成因已经得到证实^[1],而黄土地层以下的红粘土的成因也随着研究的深入获得比较一致的认识,即红粘土为风成成因^[24~27]。在黄土环境研究的常用指标中,有的在运用到红粘土中得到较好的效果,如游离铁/总铁比值^[28]、粘土矿物等,但也有指示意义不明确的指标,最典型的红粘土中的磁化率。因此,在以后红粘土的研究中,还需进一步提取环境意义明确的指标,这部分的工作目前正在进行。在此,我们把在黄土和红粘土研究中的一些较新的代用指标作一评述。主要包括物理参数指标、矿物指标、元素地球化学指标、有机地球化学指标和同位素地球化学指标。

2.1 物理指标

2.1.1 粒度 粒度较早运用到黄土环境研究中,平均粒径的变化指示了冬季风强弱。随着研究的深入,研究者都指出了粒度指标应用于环境研究中的不足,但这也促使了对粒度指标进一步的研究。较早的研究中,发现了不同粒径组分有不同的古气候意义,洛川剖面 S2 上的粒度分析显示, $8\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 和 $74\ \mu\text{m}$ 是重要的分界线,大于 $30\ \mu\text{m}$ 颗粒含量是东亚冬季风变化的较好的代用指标^[29]。通过对黄土高原西北—东南断面上 3 个黄土剖面的粒度测

量^[30],结果表明不同粒级组分的古气候意义不同,各粒级组分界限随研究地区不同而发生变化,从黄土粒度组成中可以分离出具有全球和区域古气候意义的颗粒组分,较粗颗粒含量与东亚冬季风强度变化呈正相关,具有全球意义。对黄土粒度分布研究^[31]表明,黄土粒度分布由分布峰度较高、分选较好的粗粒组分和分布峰度较低、分选较差的细粒组分叠加组成;粗粒组分代表了冬季风近距离低空搬运的粉尘,其粒度指示了东亚冬季风近地面气流的强度,在全样中的含量反映了冬季风粉尘的沉积通量;细粒组分为常态存在的、由高空气流搬运的远源粉尘,代表黄土高原原始粉尘的本底,粒度特征与北太平洋粉尘一致,指示由西风带控制的高空气流的强度。而对黄土-古土壤中的超细颗粒(平均 0.4 μm)研究^[32]表明,超细粒组分的形成与成壤作用有关。由于石英不受后期成壤作用影响,对黄土中石英粒度的研究表明^[33],其反映了原始风尘的粒度组成,因而石英的粒度组成反映冬季风的强度。而丁仲礼等^[34]对沙漠边缘黄土剖面的研究,发现沙漠进退是控制黄土沉积中砂粒含量变化的一个重要因素,因而提出用沙漠-黄土过渡带风尘沉积中砂粒百分含量变化作为指示沙漠进退的一个指标。运用此指标,发现了 3.6 Ma 以来毛乌素沙地在 2.6、1.1 和 0.6 Ma 前后三次扩张^[35]。还有研究定义了风化指数 G_w ^[36],即不同成壤强度样品的全岩-石英粒度中值粒径差值,此值越大,风化强度愈强。

2.1.2 颜色 不同气候带的土壤具有不同的颜色,基于此,有研究尝试用黄土的颜色变化来反映温度的变化。研究发现,红光亮度与反射光亮度比值的变化与磁化率和粒度的变化有很好的对应关系;值越高,样品的颜色越红,说明红光/反射光比值是一个反映温度变化的代用指标^[37]。之后,有研究建立了红土亮度指标^[38],亮度值的计算公式为:

$$Y=0.177\ 0\ R+0.812\ 4\ G+0.010\ 6\ B。$$

式中 R 、 G 和 B 分别为红色、绿色和蓝色激发值。应用此指标反映了西峰赵家川剖面气候条件和地下水作用的状况。白度参数也较好反映了黄土的古气候变化,其机制是风化成壤作用导致细粒级铁氧化物含量的增高,使得白度值降低^[39]。

2.2 矿物组成指标

2.2.1 粘土矿物 作为黄土中重要的矿物之一,粘土矿物的研究并未停滞。伊利石的结晶度反映出黄土的物质来源,并揭示了古环境的演变^[40,41];后续对三趾马红土的粘土矿物研究结果^[42],支持了伊利石结晶度作为风化成壤强度指标的结论。云母/绿

泥石比值在黄土和古土壤中随粒级的减小而增大,成为判断夏季风强度的代用指标^[40]。而 $w(\text{绿泥石}+\text{高岭石})/w(\text{伊利石})$ 比值也是夏季风变化的代用指标,与磁化率变化十分相近,其原因在于绿泥石受到化学风化,铁释放出来,形成纳米级的铁氧化物,导致磁化率值升高,透射电镜(TEM)分析提供了绿泥石风化和强磁性矿物形成之间的成因证据^[43]。还有对少见的粘土矿物坡缕石的研究^[44],在 3.6 Ma 以前灵台红粘土中存有的大量自生坡缕石指示了强蒸发的干旱环境。

2.2.2 铁氧化物矿物 在元素地球化学指标中,游离铁/总铁是一个反映风化成壤作用强度的指标,但随着成壤强度的变化,其中铁氧化物矿物的相变如何进行,即具体得到不同铁氧化物矿物的含量较为困难。通过漫反射光谱法(DRS)来研究黄土中的赤铁矿和针铁矿,建立反映赤铁矿和针铁矿含量的校准方程,可以得到赤铁矿和针铁矿的含量^[45]。赤铁矿/针铁矿比值可作为东亚季风干/湿变化的敏感指标,高值反映了干燥环境,低值指示湿润环境。采用此比值对南京下蜀黄土的研究^[46],结合其它多指标很好地反映了 50 万年来长江下游地区环境的演化。最近对热带地区温度相对恒定、降水变化明显的连续剖面的测试表明^[47],随着降水量的增加,赤铁矿含量和磁化率的值均降低,而针铁矿含量增加,其机理在于降水量增加促使赤铁矿和磁赤铁矿转变为针铁矿。这些结果为应用铁氧化物矿物研究风尘环境变化提供了依据。

除以上矿物指标外,还有应用盐类矿物对风尘沉积物的研究^[48]。因此,不论是矿物含量的变化,还是矿物的相变,都能较好反映风尘物质堆积区的环境演化。

2.3 元素地球化学指标

事实上,黄土中的元素地球化学指标非常多,但引起元素变化的因素复杂,应用时需谨慎。

对黄土样品的连续提取实验^[49]为应用元素地球化学指标重建环境变化提供了新的技术方法,连续提取将元素分为水可溶态、可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化结合态、有机物结合态和残留态,不同元素存在的相态明显不同,如: K 和 Rb 等元素,主要赋存于残留态中,而 Ca 、 Sr 等元素主要赋存于碳酸盐结合态和残留态中, Rb/Sr 值指示了黄土和古土壤遭受的淋溶程度,是夏季风强度变化的替代性指标。早期的研究^[50]表明 Rb/Sr 比值为揭示夏季风变迁的替代指标。黄土中 Rb 、 Sr 含量在不同粒级和不同相态中分布的进一步研究,表明 Rb/Sr 值

变化在轨道时间尺度上反映了互为消长的冬季风和夏季风变化,洛川剖面 2.6 Ma 以来 Sr 含量演化趋势证实了高纬度冰盖生长与东亚季风强度之间的耦合关系,而 Rb 含量反映成壤作用对磁化率升高有贡献^[51]。酸溶实验^[52]证明 1 mol/L 的醋酸溶液能够很好溶解黄土-古土壤中的碳酸盐,而对硅酸盐矿物基本不溶解。淋溶液中的 Ca、Mg、Sr、Mn 含量能和磁化率曲线很好对应,表明它们良好的代用指标。在寻找一个不受风力分选作用影响的化学风化指标时,发现黄土中酸不溶物的 Fe/Mg 比值直接可以指示风化成壤强度,风力分选作用使 Fe、Mg 含量趋向于在细粒级中富集,而在夏季风控制的风化成壤作用中,Fe 和 Mg 发生分离,Fe 在风化剖面中残留,而 Mg 却被淋失,因而 Fe/Mg 比值可以指示成壤强度^[53]。专门针对黄土中酸不溶物的元素的研究^[54],表明 $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ 比值对气候条件变化具有相对较高的敏感性,且受沉积速率的影响较小,在源区风化状况相对稳定的前提下, $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ 比值能很好反映夏季风的变化。

通过对分粒级的元素含量测试^[55],发现在小于 50 μm 的各粒级样品 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值与粒度呈明显正相关,累积含量占全岩 98% 以上,全岩样品 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值无论在黄土中还是在古土壤中基本上反映了原始风尘颗粒大小,因此, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为很好的冬季风强度替代指标。

国内较早应用电子顺磁共振(EPR)法对黄土进行研究^[56],发现黄土中 Mn^{2+} 的 EPR 信号可能是一种反映东亚夏季风变化的代用指标。 Mn^{2+} 主要赋存于碳酸盐矿物中,黄土中有 Mn^{2+} 信号,而古土壤中没有 Mn^{2+} ,表明黄土-古土壤是处于还原-氧化交替的环境中,EPR 波谱信号可以用来反演古环境^[57]。在蜗牛壳中应用 EPR 波谱信号^[58],发现黄土层中蜗牛壳的信号强度大于古土壤,即黄土中蜗牛壳所含的 Mn^{2+} 远大于古土壤中的蜗牛壳的 Mn^{2+} 的含量,反映出前者在比较还原的条件,而后者处于氧化性较高的环境。蜗牛壳中 Mn^{2+} 的含量反映其生长环境中 Mn^{2+} 的含量和氧化还原条件,指示古气候环境。

2.4 有机地球化学指标

近十余年的黄土有机地球化学研究发展较快,除了对生物化石有机碳、氧同位素研究外,新开拓了有机分子地球化学、氮同位素以及有机元素地球化学方面的研究。

2.4.1 生物化石 植物硅酸体是黄土环境研究中

的一个重要的指标^[59~61]。主要是基于植硅体的类型组合与植被的关系,进而反演气候环境^[62]。最近对不同科属植硅体的形态特征研究将植硅体指标的应用推向深入^[63,64]。

蜗牛化石较早地在黄土环境研究中得到运用。进入新世纪以来,对蜗牛化石的研究朝着定量化方向发展,包括特征种属的出现、分布、丰度及最佳生存条件等。在红粘土中这些蜗牛化石为原生生物群落,反映了当时沉积的环境,蜗牛化石的组成(生物群落)和蜗牛化石的生物量(个体总数),都是古环境演化的代用指标^[65,66]。而秦安中新世黄土-古土壤序列中的蜗牛化石可分为冷干和温湿两个生态类群,其中 *Metodonitina* 类和 *athaiica* 类的种类演化为环境变化的敏感指标^[67]。此外,由于蜗牛化石氧同位素分馏的因素,使得蜗牛化石氧同位素可能应用于夏季风强度变化的研究中^[68,69]。

2.4.2 有机分子化石 在国内,早期通过兰州九州台黄土剖面的分子化石中烷烃指标的研究表明^[70]原地源的正构烷烃分布反映出末次间冰期以来发育的是草原植被景观,全新世最暖期可能有一定的木本植物,末次冰期可能出现了荒漠(草原)植被,这个结果与较早植物硅酸体证据相吻合^[61]。研究还显示,温度变化在黄土高原的 C4 植物演化中起到重要作用^[71]。由于植物叶蜡正构烷烃组分能在地质体中长久保存,并能记录历史时期植被变化特征,对古土壤中的正构烷烃进行了分析^[72,73],结果显示黄土高原植被的植物叶蜡组分变化响应于气候环境的变化,正构烷烃显示 3.3 Ma 木本植物减少,草本植物增加,可能指示了晚新生代 3.5 Ma 左右的中国内陆的干旱化。对分子化石中的 α -正构脂肪酮的研究显示, α -正构脂肪酮虽远不如其它脂肪族化合物普遍,但其广泛分布于地质体中,是在成岩/成土过程中形成^[74]。 α -正构脂肪酮的碳优势指数(CPI 值)能够反映出中国南方红土层中的旋回性变化,亦即随着成土作用的增强,CPI 值呈现降低。因此,古土壤脂肪酮 CPI 值可揭示受气候驱动的微生物作用,进而反映古气候的变化。通过对洛川剖面 S4 古土壤及相邻 L5, L4 部分黄土样品的分子化石的检测,发现了正构烷烃平均碳链长度(ACL)与磁化率和粒度之间存在良好的正相关性,土壤形成期间 ACL 值较大,在黄土堆积阶段,ACL 值较小,因此通过 ACL 可反映古环境的变化^[75]。

2.4.3 有机氮同位素 黄土高原中西部不同环境下现代植物和相应土壤氮同位素的研究表明,土壤与植物有相近的变化趋势,但土壤的氮同位素组成

较植物根的氮同位素要偏正,即植物分解过程中氮同位素存在分馏;氮同位素对降水和温度变化有明显的响应,在沿西北到东南方向,年平均降水每增加 100 mm 可能导致土壤氮同位素组成偏负约 1.31‰,随温度的增加,土壤氮同位素也趋向偏负;在降水和温度共同增加的影响下,植物根系、植物残体和土壤的氮同位素偏负,认为降水是该地区植物-土壤氮同位素变化的主要控制因素^[76]。

2.4.4 有机元素地球化学 将 TOC、TN、C/N 指标应用到黄土研究中,结果表明黄土中 TOC、TN 和 C/N 比值与磁化率良好对应,古土壤层的 TOC 和 TN 含量及 C/N 比值相对黄土层偏高,而 TN 含量值波动很小,认为 C/N 比值在黄土高原地区主要反映上覆植被 TOC 的输入,即指示上覆植物生物量的大小^[77]。

除了以上有机地球化学方面的研究外,黄土中植物碳屑的研究也取得了进展。通过 23 种现代植物碳屑的观察、测量^[78],发现根据现代植物碳屑形态的长宽比(L/W)和形态特征可分为 3 个类型,草本型碳屑,L/W 最大,平均 10.2 ± 1.3 ;木本型碳屑(灌木+乔木),L/W 较小,平均 3.1 ± 0.2 ;阔叶类植物叶片碳屑,L/W 最小,平均 1.7 ± 0.1 。通过黄土高原渭南剖面 S1 以来 12 个地层样品的碳屑形态的分析,表明碳屑形态是古生态类型的良好指标。此外,关于 C4 植物的扩张和收缩的原因一直是争论的焦点,通过对黄土高原最后两次冰期-间冰期转换期间正构烷烃碳同位素的测试研究表明 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负^[72](C4 植物丰度的降低)。尽管当时黄土高原 $p\text{CO}_2$ 较低和干旱度增加,但温度降低是主要因素。当然,湿度在黄土高原北部的 C4 植物丰度变化中有时也起到重要作用^[79]。

2.5 同位素地球化学指标

相比地球化学元素,同位素有更好的示踪效果,其气候环境意义也较为明确。

2.5.1 碳氧同位素 碳酸盐作为黄土的重要组成部分,一直为研究者孜孜不倦的研究对象,碳酸盐中碳、氧稳定同位素,也一直为研究者感兴趣。早期建立了次生碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值与古土壤形成时的古温度的线性关系,利用土壤碳酸盐碳同位素值估算了土壤 C3 和 C4 植物相对生物量,土壤碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤形成时干燥度具有数量关系^[15,80]。对现代植物和表层土壤中植物硅酸体碳同位素的研究发现 C3、C4 植物硅酸体的碳同位素值与 C3、C4 植物的碳同位素值具有很好的对应关系,植物硅酸体的碳同

位素可以明确区分出植物的光合作用途径,这表明植物硅酸体的碳同位素同样具有指示气候环境的意义^[81]。最近通过对中国典型干旱区表土分粒级样品的碳氧同位素测试^[82],发现随着粒级的减小,氧同位素逐渐偏正,碳同位素逐渐偏负,认为细粒组分中次生碳酸盐相对比例大,粗粒组分中原生碳酸盐相对占优势,次生碳酸盐氧同位素可能受蒸发的控制,碳同位素更多受植被的影响,因此,干旱区表土细粒组分碳酸盐能更好反映成壤过程中次生碳酸盐形成时期的气候环境信息。

2.5.2 锶同位素 对黄土中的 Sr 同位素有较深入研究,通过酸溶的对比实验^[83],提取出了黄土中碳酸盐组分,得到黄土中碳酸盐组分 Sr 同位素的变化,在黄土碳酸盐-弱成壤碳酸盐-古土壤碳酸盐-纯次生碳酸盐中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 依次升高。而对黄土酸不溶物中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的测试发现在洛川剖面中古土壤中酸不溶物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高于黄土层^[84]。酸溶的碳酸盐及酸不溶物中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化的机理为:黄土层碳酸盐大多为原生碎屑成因,为海相碳酸盐,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低,弱成壤至古土壤层碳酸盐逐步转为次生,经过淋溶作用硅酸盐组分高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值转移到次生碳酸盐中,导致形成的次生碳酸盐 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值升高;而酸不溶物中随着成壤作用的加强,碳酸盐组分的淋失,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也逐步升高。所以无论是碳酸盐组分,还是酸不溶物中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化,都反映了风化成壤作用强度的变化,可成为风尘沉积的环境替代性指标。

3 风尘沉积物源的示踪

对风尘沉积物源示踪可以揭示风成沉积物产生和搬运的机制,预测风尘的环境效应,指导当今的沙尘治理。在目前的风尘物源研究中,黄土高原黄土的物源确认、长距离亚洲风尘的传输搬运过程、物源区物质的变化与气候长期变化、青藏高原隆升,以及现代风尘物质来源的准确判断,都是热点问题。比如:黄土高原的黄土很可能来自于祁连山和戈壁阿尔泰山之间的干旱区^[85~87];北太平洋沉积物和格陵兰冰芯中有亚洲风尘物质的输入^[88,89];北京现代风尘物源与地质时期有较大的差别^[90]等。

目前,风尘物源示踪中,运用到的地球化学指标包括矿物特征、元素、同位素和单矿物地球化学等。

3.1 矿物特征

基于黄土中粘土矿物伊利石类型和结晶度的研究^[40],得到黄土高原黄土伊利石来源于青藏高原北缘低变质岩体系的认识。不同研究者对碳酸盐矿物

的研究发现,潜在源区沉积物和现代沙尘中的碳酸盐含量变化很大,可以作为潜在物源示踪的指标^[91~93]。虽然碳酸盐矿物在分粒级过程中易粉碎细化,但基于全粒级的含量分析可以根据粒度效应进行估算。研究人员利用 XRD 得到的矿物相对含量,建立了最强衍射峰方解石/石英、白云石/石英比值来示踪物源^[85],源区方解石/石英最强峰比值大于 0.05,白云石/石英最强峰比值大于 0.02,满足黄土高原黄土碳酸盐矿物含量特征,基于此得到塔里木、祁连山山麓和阿拉善干旱区的物质是黄土高原黄土潜在物源的认识。此外,还有研究采用伊利石/高岭石和高岭石/绿泥石比值研究中国北方大气悬浮物的物源,取得了较好的结果^[94]。

3.2 元素地球化学

地表物质被剥蚀后,通过搬运、传输,最终在适合的区域沉积下来,之后经过表生的地球化学作用。在这一系列过程中,不同元素表现各自的地球化学行为,尽管如此,研究者还是寻找到能示踪物源的元素特征。通过对佳县红粘土的主量、微量和稀土元素的分析表明其与晚更新世的黄土物质组成一致,指出红粘土为风成成因,红粘土和黄土在沉积之前都经过了多次的混合,而红粘土与黄土在 L1-S1 地层元素组成的相似性,表明在 5.0 Ma 以前的物源区的环境基本稳定^[25]。

基于矿物、同位素和元素比值(Eu/Yb, Eu/Eu*)等的研究,认为西北三大盆地(准噶尔、塔里木和柴达木盆地)不是黄土高原黄土的物源区,蒙古国南部和紧邻的戈壁、沙漠,包括巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布齐和毛乌素沙漠是黄土的主要物源区,且这些戈壁和沙漠只是粉尘和粉砂的中转地,并非物源产生地,戈壁阿尔泰山和祁连山的高山过程产生的物质才是黄土的物源^[87]。

通过对黄土和沙漠样品元素特征的深入研究^[95],选定一些能反映源区特征的元素对比值,包括 Ti/Al, Ti/Nb, Zr/Hf, Ti/Zr, Al/Na, Ba/Sr, K/Na, Rb/Sr, Th/Pb, Nb/Zr, Th/Co 和 Mg/Ca,认为在末次冰期旋回中,来自黄土高原不同剖面与黄土高原西北巴丹吉林沙漠剖面的样品的特征元素比值存在明显的不同,基于现代沙尘暴研究的结果,认为黄土高原的黄土物质来源于祁连山南麓富集粉砂质的山前冲积扇。

采自 2004 年 7 月至 2006 年 4 月帕米尔高原慕士塔格山上的气溶胶样品的主量元素的比值 Ca/Al (~0.7) 和 Fe/Al (~0.7) 与其它地方样品的不同,因而可能作为源区示踪指标^[96]。La/Th (平均

2.30~2.36) 和 Th/U (平均 2.75~3.11) 为典型的风尘沉积物,具有富轻稀土,贫重稀土,负铕异常。采集的样品元素比值高度的均一性表明区域粉尘得到了充分混合,而与同属西风影响的中天山采集的样品元素比值差别明显,表明二者物源不同。此结果揭示在亚洲内陆干旱区粉尘的物源存在不同地点至区域的差别,为基于亚洲风尘的观察建立气候模型提供了限制条件。

3.3 同位素

在物源示踪研究中,同位素由于其稳定性,一般不易在表生地球化学作用过程中发生改变,因而成为良好的示踪指标。应用到风尘系统中的同位素包括 Nd、Sr、Pb、Hf 和 Os 等同位素,目前应用最广的是 Nd-Sr 同位素,Pb、Hf、Os 等正在尝试中。

3.3.1 Nd-Sr 同位素 Liu 等^[97,98] 较早在国内运用 Nd-Sr 同位素探讨黄土的物源,其结果认为塔克拉玛干沙漠是黄土的重要源区。之后,运用 Nd-Sr 同位素研究 8 Ma 以来红粘土-黄土的 Nd、Sr 同位素的变化,发现在 2.58 Ma 前 Nd 和 Sr 同位素均发生明显的降低,指示当时气候变冷,晚新生代的构造抬升及冰川对年轻造山带的磨蚀,导致物源的变化^[99]。对灵台剖面~7 Ma 以来的 Nd-Sr 同位素研究表明, $\epsilon_{Nd}(0)$ 在 7 Ma 以来保持稳定,指示红粘土和黄土的物源一致,酸不溶物 Sr 同位素揭示冬季风在百万年时间尺度上的变化^[100]。对更多的 Sr-Nd 同位素数据分析后认为,塔里木盆地、内蒙古中西部沙漠、青藏高原是黄土的主要源区^[101]。研究者系统采集了中国 10 个主要沙漠或沙地样品^[102],以及在黄土高原西峰、环县和洛川剖面采集了马兰黄土样品,通过选择合适的粒级和样品处理方法,对样品酸不溶物进行了 Nd 和 Sr 同位素组成的测定,结果表明,中国沙漠的 Nd 同位素组成 $\epsilon_{Nd}(0)$ 可分为 A1:古尔班通古特沙漠、呼伦贝尔沙地(-1.2~-4.0);A2:浑善达克沙地、科尔沁沙地(-4.4~-7.0);B:塔克拉玛干沙漠、柴达木沙漠、阿拉善高原(巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠);(-7.4~-11.7);以及 C:鄂尔多斯高原(毛乌素沙漠和库布齐沙漠)(-11.8~-17.2);基于此,认为黄土高原黄土物质可能最终来源于青藏高原东北缘。有研究把潜在源区样品分为小于 75 μm 和小于 5 μm 两个粒级^[85],粒度效应主要体现在小于 2 μm 粒级,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比全粒级高出一般不超过 0.006,其余粒级 Sr 同位素组成与全岩相当。黄土小于 2 μm 组分含量小于 15%,Sr 含量是其它粒级的 2/3 左右。在极端情况下,小于 2 μm 含量变化范围为 0

~15%, 粒度变化对黄土硅酸盐组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的影响小于0.001, 远小于潜在源区物质Sr同位素的变化范围, 因对Sr同位素物源示踪影响不大。通过对黄土高原中西部 and 东部的Sr-Nd同位素的测定^[103], 认为黄土高原内部两个区域的物质来源存在差异。最近对黄土高原黄土、河西走廊和青藏高原东北部黄土、河床沙和湖泥样的Nd-Sr同位素测试^[104], 表明青藏高原东北部、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠可能是黄土高原黄土的源区, 而黄土高原黄土、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠里沙漠物质可能最终都来源于青藏高原东北部。进一步对中国各地黄土进行的测试, 发现中国北方从西到东9个剖面黄土的Nd-Sr同位素组成在冰期-间冰期尺度上相对稳定, 中国北方黄土Nd-Sr同位素组成区域特征明显^[86,105], 这一点也与已有的结果一致^[102]。黄土与潜在源区Nd-Sr同位素对比^[85,86]指示中国黄土均来自其上风向临近干旱区, 具有近源性, 与黄土含大量粉砂粒级相一致, 所揭示的风尘搬运路线与地面盛行风向一致。伊犁黄土与天山剥蚀物类似; 塔里木盆地和准格尔盆地南缘黄土分别来自塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特沙漠; 青藏高原三江源黄土来自本地沙区; 祁连山南麓黄土来自柴达木和祁连山南麓; 河西走廊黄土与祁连山北麓冲积物一致; 陕甘黄土高原黄土来自其西北上风向祁连山与戈壁阿尔泰山之间的广袤干旱区; 山西黄土物源与陕甘黄土接近, 并在搬运过程中叠加了邻近上风向鄂尔多斯干旱区少量物质; 东北黄土与浑善达克沙地和科尔沁沙地物质特征接近; 北京黄土处于山西黄土和东北黄土之间, 物源为此两处黄土物源的混合。

3.3.2 其它同位素 除Nd-Sr同位素外,Pb同位素应用于物源研究中的报道较多,Hf同位素的应用在国外有报道^[106,107], 而国内还没有。Os同位素的应用情况和Hf一样, 在国外有应用。此外, 也有应用碳酸盐稳定碳氧同位素进行风尘物源示踪的研究^[92]。

对中国北方沙尘源区风成沙的Pb同位素的研究表明, 中国北方沙尘源区风成沙Pb同位素的空间分布具有明显的区域差异^[108], 毛乌素沙地具有最低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值, 塔克拉玛干沙漠具有最大的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值, 其它地区介于两者之间。Pb同位素在中国北方黄土、格陵兰冰芯粉尘和北太平洋深海沉积物源区示踪方面具有较好的应用。对黄土高原泾川剖面风尘物硅酸盐组分Pb同位素的测试表明, 新近纪红粘土和第四纪风尘沉积物有差别^[109],

再次证实了运用Nd-Sr同位素得到的结果, 即2.6 Ma前后的物源发生了变化。

此外, 对浑善达克沙地末次盛冰期以来的样品进行测试时, 应用了Hf同位素进行示踪^[110] (具体内容详见后面的单矿物地球化学中)。

3.3.3 单矿物地球化学 近年来, 单颗粒锆石U-Pb定年技术发展迅速, 应用到各类沉积物的物源示踪。锆石在表生循环中非常稳定, U-Pb同位素体系较为封闭, 物源指示意义明确。单颗粒锆石U-Pb定年示踪技术主要通过测试和对比沉积物与潜在源区物质锆石颗粒的年龄分布谱, 从而圈定源区。研究发现中国北方数个沙漠之间锆石年龄谱差异明显, 具有区分各潜在风尘源区的能力^[110]。通过对浑善达克沙地末次冰盛期(LGM)以来沙样的碎屑锆石原位U-Pb年龄和Hf同位素组成的分析, 并与周围可能源区的岩石年龄和Hf同位素组成进行对比, 发现浑善达克沙样的U-Pb年龄主要可以分为3组(2.6~2.3 Ga, 2.2~1.6 Ga和显生宙100~500 Ma)。其中较老的两组和具有负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的显生宙锆石可能来源于华北克拉通北部的燕山褶皱带, 而具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的显生宙锆石可能来源于中亚造山带东部。

碳酸盐矿物中的元素组成也具有示踪物源的功能。通过电子探针测试^[86]表明, 黄土和潜在源区碎屑方解石中Mn含量很高, 碎屑碳酸盐风化溶解释放出的 Mn^{2+} 在氧化条件下迅速沉淀, 导致次生碳酸盐中几乎不含Mn, Mg与Mn的情况类似。黄土原生碳酸盐Mg/Ca和Mn/Ca比值较高, 次生碳酸盐Mg/Ca和Mn/Ca比值趋近于零, Mg/Ca和Mn/Ca的高比值指向原始风尘成分, 而只有祁连山麓和阿拉善高原干旱区的碳酸盐Mg/Ca和Mn/Ca比值能达到黄土原生碳酸盐中Mg/Ca和Mn/Ca比值。

对中国北方沙漠中石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的研究表明, 其值存在明显差异, 有变质成因, 有岩浆成因^[111]。石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的区域差异是由于不同沙源造成, 因而具有示踪功能。

对中国北方和蒙古南部的9个戈壁、沙漠石英进行了电子自旋信号强度和结晶度的研究, 发现两个指标能有效区分不同戈壁、沙漠的石英样品, 是物源示踪的良好指标^[112]。两个指标揭示出塔克拉玛干、古尔班通古特、巴丹吉林、腾格里沙漠和蒙古南部戈壁的细粒碎屑物质来源于附近构造抬升风化和冰川磨蚀的高山过程; 毛乌素沙漠细粒物质来源于下伏鄂尔多斯高原剥蚀的物质; 库布齐沙漠细粒物质则来源于黄河中游河床物质; 浑善达克和科尔沁

沙地的细粒物质来源于远源沙漠和(或)临近的大兴安岭剥蚀物质的混合。

利用黄土中白云石的碳氧同位素组成也能很好示踪物源^[85]。前述已提及,通过碳酸盐含量,特别是白云石含量可进行黄土高原的物源限定,而通过白云石碳氧同位素可进一步缩小黄土高原黄土的物源区,结果显示,黄土高原黄土的物源区限定为塔里木、祁连山麓和阿拉善干旱区。

4 展 望

前述总结了新世纪以来亚洲风尘系统地球化学研究的进展。总体上,从风尘沉积揭示的古环境演化方面有很多新发现,对矿物在表生循环中的变化有新的认识,揭示了各种矿物中元素的地球化学行为;对特定的矿物研究,如铁氧化物的研究,也有新的认识;有机地球化学展示出新的活力,无论是从有机碳、氮同位素的研究,还是从生物化石、分子化石的研究,显示出很大的潜力。在风尘物源示踪方面,新方法、成果不断涌现,各种认识、观点不断碰撞,呈现良好的发展态势。

展望未来,揭示风尘沉积的古环境变化研究需要地球化学强有力的支持。地球化学气候指标的环境指示意义需要从矿物学、元素地球化学、生物活动影响等方面进行深入的研究,找到各种影响因素,评价主导因素,并尽可能建立定量化的关系。在这方面,分子化石方向的研究值得期待。从目前发展来看,找到新的环境变化替代指标远远不能满足当前研究的需要,建立各种指标与气候参数,如降水、气温、干燥度、风力强度等的定量关系成为发展趋势。

红粘土的研究是风尘研究中的重要内容,红粘土虽然也为风尘沉积,但其性质与黄土有一定差别,目前的研究得到了一些新的代用指标,但这仍显不够,因此,针对红粘土的代用指标有待深入。此外,对红粘土的物质来源,红粘土沉积时大气环流状况,不同气候系统的发育演变情况,都需要展开更广泛的研究。

事实上,亚洲风尘系统包括了中亚、蒙古、西亚乃至北亚区域分布的荒漠区域的地表物质,因此,对亚洲风尘的沉积必须从国内走向国外,这需要展开国际合作,完成对中亚风尘的深度研究。

在风尘物源示踪方面已使用了很多地球化学方法,但深入系统的工作还较少,在研究方法上还需从大气环流、地貌证据,矿物特征等方面综合分析。在风尘物质产生过程方面,需要调查风尘沉积、现代风尘和所有潜在源区物质的特征,仔细分辨选用的地

球化学指标蕴含的地质意义及多解性,谨慎分析风力分选、沉积成壤作用,以及样品处理过程中可能的不确定性因素。从研究的趋势看,样品前处理中已从全岩组分转变到特定组分(如硅酸盐组分)和特定的粒级组分,再到单矿物的地球化学阶段。需要指出,碎屑单矿物,特别是石英等主要造岩矿物的地球化学组成的物源指示明确,基本不受风力分选和成壤作用的影响,是物源示踪的良好指标,但单矿物示踪指标的基本原理和研究程度还有待进一步的加强。在干旱区,由于不同荒漠物质粒度组成差异明显,因此在潜在源区的研究中,应选用细粒级组分。

现代风尘研究表明,沙尘事件的起源区和传播路径具有复杂性,同一次沙尘过程影响不同地点,其Sr-Nd同位素值也有明显差异,与源区的不均一性和风尘传播过程中其它物质的混染有关。因此,现代沙尘的研究需要长期的观测和分析,基于不同观测台站的数据分析,建立沙尘输送的模型。

致 谢:成文过程中得到南京大学鹿化煜教授、陈忠博士、李高军博士和陈旻博士热情帮助和建议,在此深表感谢!

参考文献 (References):

- [1] 刘东生,等. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Liu Dongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)
- [2] 李华梅, 安芷生, 王俊达. 午城黄土剖面古地磁研究的初步结果[J]. 地球化学, 1974, 2: 93-104.
Li Huamei, An Zhisheng, Wang Junda. Preliminary paleomagnetic study of loess from the Wucheng section, northern China[J]. Geochimica, 1974, 2: 93-104. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘东生, 安芷生. 洛川北韩寨磁性地层学的初步研究[J]. 地球化学, 1984, 2: 134-137.
Liu Dongsheng, An Zhisheng. A preliminary magnetostratigraphic study of the Beihanzhai loess section[J]. Geochimica, 1984, 2: 134-137. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李虎侯. 黄土的热释光年代[J]. 地球化学, 1982, 1: 82-84.
Li Huhou. Thermoluminescence age of Loess[J]. Geochimica, 1982, 1: 82-84. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李虎侯. 马兰黄土的热释光年龄[J]. 中国科学(B辑), 1986, 12: 1309-1316.
Li Huhou. Formation age of Malan loess dated by thermoluminescence[J]. Science in China(B), 1986, 12: 1309-1316. (in Chinese with English abstract)
- [6] 丁仲礼, 余志伟, 刘东生. 中国黄土研究新进展(三)时间标尺[J]. 第四纪研究, 1991, 11(4): 336-347.
Ding Zhongli, Yu Zhiwei, Liu Dongsheng. Progress in loess research (part 3) time scale[J]. Quaternary Sciences, 1991,

- 11(4): 336—347. (in Chinese with English abstract)
- [7] 鹿化煜, 杨文峰, 刘晓东, 安芷生. 轨道调谐建立洛川黄土层的时间标尺[J]. 地球物理学报, 1998, 41(6): 804—810.
Lu Huayu, Yang Wenfeng, Liu Xiaodong, An Zhisheng. Orbital tuned time scale for loess deposit in Luochuan of central Chinese Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(6): 804—810. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体 AMS ^{14}C 测年和同位素分析[J]. 海洋通报, 1997, 16(3): 89—96.
Wang Yongji, Lü Houyuan. AMS ^{14}C dating and isotopic analysis of phytoliths[J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(3): 89—96. (in Chinese with English abstract)
- [9] Kukla G. Loess stratigraphy in central China[J]. Quaternary Science Review, 1987, 6: 191—219.
- [10] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciations[J]. Nature, 1995, 375: 305—308.
- [11] Xiao J L, Porter S C, An Z S, Kumai H, Yoshikawa S. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000yr[J]. Quaternary Research, 1995, 43: 22—29.
- [12] 郭正堂, Fedoroff N, 刘东生. 130 ka 来黄土-古土壤序列的典型微形态特征与古气候事件[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(5): 392—398.
Guo Zhengtang, Fedoroff N, Liu Dongsheng. Micromorphology of the loess-paleosol sequence of the last 130 ka in China and paleoclimatic events[J]. Science in China(D), 1996, 26(5): 392—398. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈骏, 汪永进, 季峻峰, 鹿化煜. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及气候地层学意义[J]. 第四纪研究, 1999, 19(4): 350—356.
Chen Jun, Wang Yongjin, Ji Junfeng, Lu Huayu. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a loess-paleosol profile from Luochuan, Shaanxi Province[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(4): 350—356. (in Chinese with English abstract)
- [14] 韩家懋, 姜文英, 吴乃琴, 郭正堂. 黄土中钙结核的碳氧同位素研究:(一)氧同位素及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 1995, 15(2): 130—138.
Han Jiamao, Jiang Wenying, Wu Naiqin, Guo Zhengtang. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonate concretions in loess part1: Oxygen and paleotemperature[J]. Quaternary Sciences, 1995, 15(2): 130—138. (in Chinese with English abstract)
- [15] 韩家懋, 姜文英, 吕厚远, 吴乃琴, 郭正堂. 黄土中钙结核的碳氧同位素研究:(二)碳同位素及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 1995, 15(4): 367—377.
Han Jiamao, Jiang Wenying, Lü Houyuan, Wu Naiqin, Guo Zhengtang. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonate concretions in loess part2: Carbon isotope and paleo-aridity[J]. Quaternary Sciences, 1995, 15(4): 367—377. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘东生. 黄土与干旱环境[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2009, 1—537.
Liu Dongsheng. Loess and arid environment[M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2009: 1—537. (in Chinese)
- [17] 董光荣, 李森, 李保生, 王跃, 闫满存. 中国沙漠形成演化的初步研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(4): 23—32.
Dong Guangrong, Li Sen, Li Baosheng, Wang Yue, Yan Mancun. A preliminary study on the formation and evolution of deserts in China[J]. Journal of Desert Research, 1991, 11(4): 23—32. (in Chinese with English abstract)
- [18] 董治宝, 董光荣, 陈广庭. 风沙物理学研究进展[J]. 大自然探索, 1995, 14(3): 30—38.
Dong Zhibao, Dong Guangrong, Chen Guangting. Progress on dust physics research[J]. Exploration of Nature, 1995, 14(3): 30—38. (in Chinese with English abstract)
- [19] 董光荣, 金炯, 李保生, 高尚玉, 邵亚军. 科尔沁沙地沙漠化的几个问题——以南部地区为例[J]. 中国沙漠, 1994, 14(1): 1—9.
Dong Guangrong, Jin Jiong, Li Baosheng, Gao Shangyu, Shao Yajun. Several problems on the desertification of Horqin Sand Land, Northeast China—a case study on its south area[J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(1): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李保生, 靳鹤龄, 吕海燕, 祝一志, 董光荣, 孙东怀, 张甲坤, 高全洲, 闫满存. 150ka 以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(1): 85—90.
Li Baosheng, Jin Helin, Lu Haiyan, Zhu Yizhi, Dong Guangrong, Sun Donghuai, Zhang Jiakun, Gao Quanzhou, Yan Mancun. Processes of the deposition and vicissitude of Mu Us Desert, China since 150 ka B. P. [J]. Science in China(D), 1998, 28(1): 85—90. (in Chinese with English abstract)
- [21] 靳鹤龄, 董光荣, 金炯, 李保生, 邵亚军. 塔克拉玛干沙漠腹地晚冰期以来的环境与气候变化[J]. 中国沙漠, 1994, 14(3): 31—37.
Jin Helin, Dong Guangrong, Jin Jiong, Li Baosheng, Shao Yajun. Environmental and climatic changes in the interior of Taklimakan Desert since Late Glacial Age[J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(3): 31—37. (in Chinese with English abstract)
- [22] Pye K. Dust deposition in the oceans. In: Pye K. Aeolian dust and dust deposits[M]. London: Academic Press, 1987: 171—197.
- [23] 鹿化煜, Stevens T, 弋双文, 孙雪峰. 高密度光释光测年揭示的距今约 15~10 ka 黄土高原侵蚀事件[J]. 科学通报, 2006, 51(23): 2767—2772.
Lu Huayu, Stevens T, Yi Shuangwen, Sun Xuefeng. An erosional hiatus in Chinese loess sequences revealed by closely spaced optical dating[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(23): 2767—2772. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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.
Lu Huayu, An Zhisheng. Comparison of grain-size distribu-

- tion of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 226—232. (in Chinese with English abstract)
- [25] Lu H Y, Vandenberghe J, An Z S. Aeolian origin and palaeoclimatic implications of the 'Red Clay' (North China) as evidenced by grain-size distribution[J]. *Journal of Quaternary Sciences*, 2001, 16(1): 89—97.
- [26] Ding Z L, Sun J M, Yang S L, Liu T S. Geochemistry of Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implication for its origin, source provenance and paleoclimate change[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, 65: 901—913.
- [27] Guo Z T, Ruddiman, W F, Hao Q Z, Wu H B, Qiao Y S, Zhu R X, Peng S Z, Wei J J, Yuan B Y, Liu T S. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 159—163.
- [28] Guo Z T, Liu T S, Guiot J, Wu N, Lu H, Han J, Liu J, Gu Z. High frequency pulses of East Asian monsoon climate in the last two glaciations: link with the North Atlantic[J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12: 701—709.
- [29] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(1): 66—69.
Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size in loess from Luochuan profile, Loess Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(1): 66—69. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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)*, 1998, 28(3): 278—283.
Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau. *Science in China(D)*, 1998, 28(3): 278—283. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孙东怀, 鹿化煜, Rea D, 孙有斌, 吴胜光. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 327—335.
Sun Donghuai, Lu Huayu, Rea D, Sun Youbin, Wu Shengguang. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 327—335. (in Chinese with English abstract)
- [32] 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 928—936.
Sun Donghuai. Super-fine grain size component in Chinese loess and their paleoclimatic implication[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 928—936. (in Chinese with English abstract)
- [33] 孙有斌, 鹿化煜, 安芷生. 黄土-古土壤中石英颗粒的粒度分布[J]. *科学通报*, 2000, 45: 2094—2097.
Sun Youbin, Lu Huayu, An Zhisheng. Grain size distribution of quartz isolated from Chinese loess/paleosol[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 2094—2097. (in Chinese with English abstract)
- [34] 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)*, 1999, 29(1): 82—87.
Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. *Science in China(D)*, 1999, 29(1): 82—87. (in Chinese with English abstract)
- [35] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 上新世以来毛乌素沙地阶段性扩张的黄土-红粘土沉积证据[J]. *科学通报*, 1999, 44(3): 423—425.
Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. Stepwise advance of the Mu Us Desert since late Pliocene: Evidence from a red clay-loess record[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(3): 423—425. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘进峰, 乔彦松, 郭正堂. 风尘堆积全岩和石英粒度变化对风化成壤强度的指标[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 270—276.
Liu Jinfeng, Qiao Yansong, Guo Zhengtang. The differences of grain size of quartz and bulk samples as an indicator of weathering intensity in the Aeolian deposits[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 270—276. (in Chinese with English abstract)
- [37] 杨石岭, 丁仲礼, 秦小光, 顾兆炎. 黄土沉积中红光/反射光亮度值变化及古气候意义[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(4): 380.
Yang Shiling, Ding Zhongli, Qin Xiaoguang, Gu Zhaoyan. The variation of luminosity ratios of red to reflected light in loess and its paleoclimatic implications[J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(4): 380. (in Chinese with English abstract)
- [38] 彭淑贞, 郭正堂. 西峰晚第三纪红土记录的亮度学特征[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 110.
Peng Suzhen, Guo Zhengtang. Luminosity characteristics recorded in late Tertiary Red Clay in Xifeng profile[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 110. (in Chinese with English abstract)
- [39] 陈旸, 陈骏, 季峻峰, 刘连文, 鹿化煜. 陕西洛川黄土剖面的白度参数及其古气候意义[J]. *地质论评*, 2002, 48(1): 38—43.
Chen Yang, Chen Jun, Ji Junfeng, Liu Lianwen, Lu Huayu. Whiteness Intensity in Luochuan Loess Sequence (Shaanxi Province) and Paleoclimatic Implications[J]. *Geological Review*, 2002, 48(1): 38—43. (in Chinese with English abstract)
- [40] 季峻峰, 王洪涛, 陈骏. 陕西洛川黄土-古土壤剖面中伊利石结晶度——黄土物质来源和古气候环境的指示[J]. *地质论评*, 1997, 43(2): 181—185.
Ji Junfeng, Wang Hongtao, Chen Jun. Crystallinity of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence, Shaanxi Province—indicators origin and paleoclimate of loess[J]. *Geological Review*, 1997, 43(2): 181—185. (in Chinese with English abstract)
- [41] Ji J, Chen J, Lu H Y. Origin of illite in the loess from the Luochuan area, Loess Plateau, central China[J]. *Clay Minerals*, 1999, 34(4): 525—532.
- [42] 彭淑贞, 郭正堂. 风成三趾马红土与第四纪黄土的粘土矿物组成异同及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 277

- 285.
Peng Suzhen, Guo Zhengtang. Clay mineral composition of the tertiary Red Clay and the Quaternary loess-paleosols as well as its environmental implication[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 277—285. (in Chinese with English abstract)
- [43] 赵良. 黄土高原风成序列中气候敏感矿物研究[D]. 南京: 南京大学, 2006.
Zhao Liang. Minerals sensitive to climate change in eolian sequences, Chinese Loess Plateau[D]. Nanjing: Nanjing University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [44] 谢巧琴, 陈天虎, 季峻峰, 陈骏, 徐慧芳, 徐晓春. 甘肃灵台黄土红粘土序列中坡缕石的分布及其古气候意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(6): 653—658.
Xie Qiaoqin, Chen Tianhu, Ji Junfeng, Chen Jun, Xu Hui-fang, Xu Xiaochun. The distribution of palygorskite in Ling-tai section of Chinese Loess Plateau and its paleoclimate significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(6): 653—658. (in Chinese with English abstract)
- [45] 季峻峰, 陈骏, Balsam W, 刘连文, 陈旸, 赵良, 周玮. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 221—229.
Ji Junfeng, Chen Jun, Balsam W, Liu Lianwen, Chen Yang, Zhao Liang, Zhou Wei. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 221—229. (in Chinese with English abstract)
- [46] Zhang W G, Yu L Z, Lu M, Zheng X M, Ji J F, Zhou L M, Wang X Y. East Asian summer monsoon intensity inferred from iron oxide mineralogy in the Xiashu Loess in southern China[J]. Quaternary Science Review, 2009, 28: 345—353.
- [47] Long X, Ji J, and Balsam W. Rainfall dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: Spectral and magnetic measurements [J]. J. Geophys. Res., 2011, 116, F03015, doi:10.1029/2010JF001712.
- [48] 孙斌, 郭正堂, 尹秋珍, 郝青振. 西宁第四纪黄土-古土壤序列中的可溶盐、来源及环境意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(4): 649—656.
Sun Bin, Guo Zhengtang, Yin Qiuzhen, Hao Qingzhen. Soluble salts in a Quaternary loess-paleosol sequence near Xining and environmental implications [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(4): 649—656. (in Chinese with English abstract)
- [49] 刘连文, 陈骏, 陈旸, 季峻峰. 黄土的连续提取实验及 Rb/Sr 值意义[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 65—70.
Liu Lianwen, Chen Jun, Chen Yang, Ji Junfeng. Sequential extraction procedure of loess and paleosol and the implications of Rb/Sr ratios[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 65—70. (in Chinese with English abstract)
- [50] 陈骏, 仇纲. 最近 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据[J]. 科学通报, 1996, 41(21): 1963—1966.
Chen Jun, Qiu Gang. Variation of summer monsoon intensity on the Loess Plateau of central China over the last 130 ka evidence from Rb and Sr distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(21): 1963—1966. (in Chinese with English abstract)
- [51] 陈骏, 汪永进, 陈旸, 刘连文, 季峻峰, 鹿化煜. 中国黄土层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 259—266.
Chen Jun, Wang Yongjin, Chen Yang, Liu Lianwen, Ji Junfeng, Lu Huayu. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 259—266. (in Chinese with English abstract)
- [52] 刘连文, 王洪涛, 陈旸, 陈骏. 黄土醋酸淋溶实验及其碳酸盐组分的地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(1): 69—75.
Liu Lianwen, Wang Hongtao, Chen Yang, Chen Jun. Chemical leaching of loess deposits in China and its implications for carbonate composition[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(1): 69—75. (in Chinese with English abstract)
- [53] 刘连文, 陈骏, 王洪涛, 陈旸. 一个不受风力分选作用影响的化学风化指标: 黄土酸不溶物中的 Fe/Mg 值[J]. 科学通报, 2001, 46(7): 578—582.
Liu Lianwen, Chen Jun, Wang Hongtao, Chen Yang. A chemical index of weathering without effect of wind sorting: Fe/Mg ratios in the acid-insoluble phases of loess deposits [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(7): 578—582. (in Chinese with English abstract)
- [54] 高玲, 丁仲礼. 最近 130 ka 来黄土物质化学风化的空间观察[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 162—168.
Gao Lin, Ding Zhongli. Spatial changes of chemical weathering recorded by loess deposits in the Chinese Loess Plateau during the past 130,000 years [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(1): 162—168. (in Chinese with English abstract)
- [55] 彭淑贞, 郭正堂. 风尘堆积中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 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(D辑), 2001, 31(增刊): 209—214.
Peng Shuzhen, Guo Zhengtang. The relation between $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio and grain size in dust deposition and its implication for East Asian winter monsoon[J]. Science in China(D), 31(suppl.): 209—214. (in Chinese with English abstract)
- [56] 陈骏, 季峻峰, 眭云霞, 鹿化煜. 陕西洛川黄土中 Mn^{2+} 的电子顺磁共振特征与古季风变迁[J]. 科学通报, 1997, 42(2): 4019—4022.
Chen Jun, Ji Junfeng, Sui Yunxia, Lu Huayu. The EPR characteristics of Mn^{2+} in Luochuan loess, Shaanxi Province and evolution of paleo-monsoon[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(2): 4019—4022. (in Chinese with English abstract)
- [57] Ji J F, Chen J. An EPR study on the chemical form of Mn^{2+} in the Chinese loess samples[J]. Spectroscopy Letters, 2000, 33(2): 201—209.
- [58] 盛雪芬, 陈骏, 季峻峰, 眭云霞. 黄土中蜗牛壳 Mn^{2+} 的 EPR 研究及其古气候意义[J]. 高校地质学报, 2002, 8(1): 40—45.

- Sheng Xuefang, Chen Jun, Ji Junfeng, Sui Yunxia. An EPR study on mollusk Shells from loess-paleosol sequences in the Loess Plateau, central China[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(1): 40—45. (in Chinese with English abstract)
- [59] 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体研究及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1—228.
- Wang Yongji, Lü Houyuan. Research on phytolith and its application[M]. Beijing: Ocean Press, 1993: 1—228. (in Chinese)
- [60] 吕厚远, 王永吉. 晚更新世以来洛川黑木沟黄土地层植物硅酸体研究及古植被演替[J]. 第四纪研究, 1991, 11(1): 72—84.
- Lü Houyuan, Wang Yongji. A study on phytoliths in loess profile and paleoenvironmental evolution at Heimugou in Luochuan, Shaanxi Province since late Pleistocene[J]. Quaternary Sciences, 1991, 11(1): 72—84. (in Chinese with English abstract)
- [61] 吕厚远, 吴乃琴, 刘东生, 韩家懋, 秦小光, 孙湘君, 王永吉. 150 ka 来宝鸡黄土植物硅酸体组合季节性气候变化[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(2): 131—136.
- Lü Houyuan, Wu Naiqin, Liu Dongsheng, Han Jiamao, Qin Xiaoguang, Sun Xiangjun, Wang Yongji. The seasonal variations of phytolith composition in loess in Baoji, Shaanxi Province over the last 150 ka[J]. Science in China(D), 1996, 26(2): 131—136. (in Chinese with English abstract)
- [62] 吕厚远, 刘东生, 吴乃琴, 韩家懋, 郭正堂. 末次间冰期以来黄土高原南部植被演替的植物硅酸体记录[J]. 第四纪研究, 1999, 19(4): 336—349.
- Lü Houyuan, Liu Dongsheng, Wu Naiqin, Han Jiamao, Guo Zhengtang. Phytolith record of vegetation succession in the southern Loess Plateau since Pleistocene[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(4): 336—349. (in Chinese with English abstract)
- [63] 秦利, 李杰, 旺罗, 吕厚远. 青藏高原常见早熟禾亚种植硅体形态特征初步研究[J]. 古生物学报, 2008, 47(2): 176—184.
- Qin Li, Li Jie, Wang Luo, Lü Houyuan. The morphology and assemblages of phytolith in poidea from the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2008, 47(2): 176—184. (in Chinese with English abstract)
- [64] 徐德克, 李泉, 吕厚远. 棕榈科植硅体形态分析及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2005, 25(6): 785—792.
- Xu Deke, Li Quan, Lü Houyuan. Morphological analysis of phytoliths in palme and its environmental significance[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(6): 785—792. (in Chinese with English abstract)
- [65] 裴云鹏, 吴乃琴, 李丰江. 晚第三纪红黏土成因和沉积环境的生物学证据: 蜗牛化石记录[J]. 科学通报, 2004, 49(13): 1294—1298.
- Pei Yunpeng, Wu Naiqin, Li Fengjiang. The origin and biological evidence of sedimentary environment of Late Tertiary Red Clay: Record from snail record[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(13): 1294—1298. (in Chinese with English abstract)
- [66] 裴云鹏, 吴乃琴. 甘肃西峰红粘土层中蜗牛化石记录的古气候变化周期[J]. 第四纪研究, 2005, 25(5): 663.
- Pei Yunpeng, Wu Naiqin. The cycle of paleoclimatic change recorded by snail fossils in Red Clay in Xifeng, Gansu Province[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(5): 663. (in Chinese with English abstract)
- [67] 李丰江, 吴乃琴, Rousseau D D. 黄土高原秦安中新世黄土-古土壤序列的蜗牛化石初步研究[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(5): 438—444.
- Li Fengjiang, Wu Naiqin, Rousseau D D. Preliminary study of mollusk fossils in the Qinan Miocene loess-soil sequence in Western Chinese Loess Plateau[J]. Science in China(D), 2006, 36(5): 438—444. (in Chinese with English abstract)
- [68] 盛雪芬, 陈骏, 杨杰东, 季峻峰, 陈旸. 不同粒级黄土-古土壤中碳酸盐碳氧稳定同位素组成及其古环境意义[J]. 地球化学, 2002, 31(2): 105—112.
- Sheng Xuefang, Chen Jun, Yang Jiedong, Ji Junfeng, Chen Yang. Carbon and oxygen isotopic composition of carbonate in different grain size fractions from loess-paleosol sequences, China[J]. Geochemica, 2002, 31(2): 105—112. (in Chinese with English abstract)
- [69] 刘宗秀, 顾兆炎, 许冰, 吴乃琴. 夏季风降水对黄土高原现生蜗牛壳体碳酸盐氧同位素组成的影响[J]. 第四纪研究, 2006, 26(4): 643—648.
- Liu Zongxiu, Gu Zhaoyan, Xu Bin, Wu Naiqin. Monsoon precipitation effect on oxygen isotope composition of land snail shell carbonate from Loess Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(4): 643—648. (in Chinese with English abstract)
- [70] 谢树成, 王志远, 王红梅, 陈发虎, 安成邦. 末次间冰期以来黄土高原的草原植被景观: 来自分子化石的证据[J]. 中国科学 D 辑, 2002, 32(1): 28—35.
- Xie Shucheng, Wang Zhiyuan, Wang Hongmei, Chen Fahu, An Chengbang. The occurrence of a grassy vegetation over the Chinese Loess Plateau since the last interglacier: the molecular fossil record[J]. Science in China(D), 2002, 32(1): 28—35. (in Chinese with English abstract)
- [71] Zhang Z H, Zhao M X, Lu H Y, Faiia A M. Lower temperature as the main cause of C4 plant declines during the glacial periods on the Chinese Loess Plateau[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2003, 214: 467—481.
- [72] Zhang Z H, Zhao M X, Eglinton G, Lu H Y, Huang C Y. Leaf wax lipids as paleovegetational and paleoenvironmental proxies for the Chinese Loess Plateau over the last 170 kyr[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(5—6): 575—594.
- [73] 刘卫国, 张普, 孙有斌, 黄永松, 郭正堂, 安芷生. 黄土高原中部 7~2 Ma 期间古植被变化的分子化石证据——以赵家川剖面为例[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 806—811.
- Liu Weiguo, Zhang Pu, Sun Yongbin, Huang Yongsong, Guo Zhengtang, An Zhisheng. Molecule fossil evidence for

- paleo-vegetation changes in the central of Chinese Loess Plateau during 7~2 Ma-Zhaojiachuan profile as an example[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 806—811. (in Chinese with English abstract)
- [74] 谢树成, 梁斌, 顾延生, 杨欢. 脂肪酮分子在第四纪古土壤中的分布及其古气候意义[J]. *古生物学报*, 2008, 47(3): 273—278.
- Xie Shucheng, Liang Bin, Gu Yansheng, Yang Huan. Distributions of n-alkan-2-ones in Quaternary paleosols indicative of paleoclimatic changes[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2008, 47(3): 273—278. (in Chinese with English abstract)
- [75] 张虎才, 杨明生, 张文翔, 雷国良, 常凤琴, 蒲阳, 樊红芳. 洛川黄土剖面 S4 古土壤及相邻黄土层分子化石与植被变化[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(12): 1634—1642.
- Zhang Hucai, Yang Mingsheng, Zhang Wenxiang, Lei Guoliang, Chang Fengqin, Pu Yang, Fan Hongfang. Molecular fossil and paleovegetation records of paleosol S4 and adjacent loess layers in the Luochuan loess section, NW China[J]. *Science in China(D)* 2007, 37(12): 1634—1642. (in Chinese with English abstract)
- [76] 刘卫国, 王政. 黄土高原现代植物—土壤氮同位素组成及对环境变化的响应[J]. *科学通报*, 2008, 53(23): 2917—2924.
- Liu Weiguo, Wang Zheng. Nitrogen isotopic composition of plant-soil in the Loess Plateau and its responding to environmental change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(23): 2917—2924. (in Chinese with English abstract)
- [77] 张普, 刘卫国. 黄土高原中部黄土沉积有机质记录特征及 C/N 指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 109—114.
- Zhang Pu, Liu Weiguo. Loess sedimentary organic matter records from the central Chinese Loess Plateau and the implication of C/N[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 109—114. (in Chinese with English abstract)
- [78] 张健平, 吕厚远. 现代植物炭屑形态的初步分析及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 857—863.
- Zhang Jianping, Lü Houyuan. Preliminary study of charcoal morphology and its environmental significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 857—863. (in Chinese with English abstract)
- [79] Lü H Y, Zhou Y L, Liu W G, Mason J. Organic stable carbon isotopic composition reveals late Quaternary vegetation changes in the dune fields of northern China[J]. *Quaternary Research*, 2012. (in press)
- [80] Han J M, Keppens E, Liu T S, Paepe R, Jiang W Y. Stable isotope composition of the carbonate concretion in loess and climate change[J]. *Quaternary International*, 1997, 37: 37—43.
- [81] 王永吉, 吕厚远, 王国安, 杨辉, 李珍. C₃, C₄ 植物和现代土壤中硅酸体碳同位素分析[J]. *科学通报*, 2000, 45(9): 978—982.
- Wang Yongji, Lü Houyuan, Wang Guoan, Yang Hui, Li Zhen. Analysis of carbon isotope in phytoliths from C₃, C₄ plants and modern soils[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(9): 978—982. (in Chinese with English abstract)
- [82] 王宁, 刘卫国. 中国西北干旱区不同粒径表土碳酸盐含量及碳、氧同位素组成[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(2): 158—165.
- Wang Ning, Liu Weiguo. Carbonate content and oxygen and carbon isotope composition of different grain size samples from the surface soil of arid land in northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(2): 158—165. (in Chinese with English abstract)
- [83] Yang J D, Chen J, An Z S, Shieldse G, Tao X C, Zhu H B, Ji J F, Chen Y. Variations in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios of calcites in Chinese loess: A proxy for chemical weathering associated with the East Asian summer monsoon[J]. *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 157: 151—159.
- [84] Yang J D, Chen J, Tao X C, Li C L, Ji J F, Chen Y. Sr isotope ratios of acid-leached loess residues from Luochuan, China: A tracer of continental weathering intensity over the past 2.5 Ma[J]. *Geochemical Journal*, 2001, 35: 403—412.
- [85] 陈骏, 李高军. 亚洲风尘系统地球化学示踪研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2011, 41(1): 1—22.
- Chen Jun, Li Gaojun. Geochemical tracing research on Asia dust system[J]. *Scientia Sinica(D)*, 2011, 41(1): 1—22. (in Chinese with English abstract)
- [86] 李高军. 东亚风尘物源地地球化学示踪研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- Li Gaojun. Tracing the source regions of East Asia dust using geochemical tools[D]. Nanjing: Nanjing University Dissertation, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [87] Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 203(3-4): 845—859.
- [88] Bory A J M, Biscaye P E, Svensson A, Grousset F E. Seasonal variability in the origin of recent atmospheric mineral dust at North GRIP, Greenland[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 196(3-4): 123—134.
- [89] Grousset F E, Biscaye P E. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes[J]. *Chem. Geol.*, 2005, 222: 149—167.
- [90] Li G, Chen J, Ji J, Yang J D, Conway T M. Natural and anthropogenic sources of East Asian dust[J]. *Geology*, 2009, 37: 727—730.
- [91] Li G, Chen J, Chen Y, Yang J D, Ji J F, Liu L W. Dolomite as a tracer for the source regions of Asian dust[J]. *J. Geophys. Res-Atmos.*, 2007, 112: D17201, doi: 10.1029/2007JD008676.
- [92] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R, Cao J J, Shen Z X. Characteristics of carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of northern China soil and dust aerosol and its application to tracing dust sources[J]. *Atmos. Environ.*, 2005, 39: 2631—2642.
- [93] Shi Z B, Shao L T, Jones T P, Lu S L. Microscopy and mineralogy of airborne particles collected during severe dust storm episodes in Beijing, China[J]. *J. Geophys. Res-Atmos.*, 2005,

- 110;D01303,doi: 01310.01029/02004JD005073
- [94] Shen Z X, Li X X, Cao J J, Caquineau S, Wang Y Q, Zhang X Y. Characteristics of clay minerals in asian dust and their environmental significance[J]. *China Particuol*, 2005, 3: 260—264.
- [95] Guan Q Y, Pan B T, Gao H S, Li N, Zhang H, Wang J P. Geochemical evidence of the Chinese loess provenance during the Late Pleistocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 270: 53—58.
- [96] Wu G J, Xu B Q, Zhang C L, Gao S P, Yao T D. Geochemistry of dust aerosol over the Eastern Pamirs[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2009, 73: 977—989.
- [97] Liu C Q, Masuda A, Okada A, Yabuki S, Zhang J, Fan Z L. A geochemical study of loess and desert sand in northern China: Implications for continental crust weathering and composition[J]. *Chem. Geol.*, 1993, 106(3-4): 359—374.
- [98] Liu C Q, Masuda A, Okada A, Yabuki S, Fan Z L. Isotope geochemistry of quaternary deposits from the arid lands in northern China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 127(1-4): 25—38.
- [99] Sun J M. Nd and Sr isotopic variations in Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, 240(2): 454—466.
- [100] 杨杰东, 陈骏, 张兆峰, 季峻峰, 陈旸. 距今 7Ma 以来甘肃灵台剖面 Nd 和 Sr 同位素特征[J]. *地球化学*, 2005, 34(1): 1—6.
Yang Jiedong, Chen Jun, Zhang Zhaofeng, Ji Junfeng, Chen Yang. Variations in $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Lingtai profile over the past 7 Ma[J]. *Geochimica*, 2005, 34(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [101] 饶文波, 杨杰东, 陈骏, 李高军. 中国干旱-半干旱区风尘物质的 Sr, Nd 同位素地球化学: 对黄土来源和季风演变的指示[J]. *科学通报*, 2006, 51(4): 378—386.
Rao Wenbo, Yang Jiedong, Chen Jun, Li Gaojun. Sr-Nd isotope geochemistry of eolian dust of the arid-semiarid areas in China: Implications for loess provenance and monsoon evolution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 378—386. (in Chinese with English abstract)
- [102] 杨杰东, 陈骏, 饶文波, 李高军, 季峻峰. 中国沙漠同位素分区特征[J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 516—524.
Yang Jiedong, Chen Jun, Rao Wenbo, Li Gaojun, Ji Junfeng. Isotopic partition characteristics of Chinese deserts[J]. *Geochimica*, 2007, 36(5): 516—524. (in Chinese with English abstract)
- [103] Rao W B, Chen J, Yang J D, Ji J F, Li G J, Tan H B. Sr-Nd isotopic characteristics of eolian deposits in the Erdos Desert and Chinese Loess Plateau: Implications for their provenances[J]. *Geochemical Journal*, 2008, 42: 273—282.
- [104] 杨杰东, 李高军, 戴澧, 饶文波, 季峻峰. 黄土高原黄土源区的同位素证据[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 195—206.
Yang Jiedong, Li Gaojun, Dai Yun, Rao Wenbo, Ji Junfeng. Isotopic evidences for provenances of loess of the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 195—206. (in Chinese with English abstract)
- [105] Li G J, Chen J, Ji J F, Liu L W, Yang J D, Sheng X F. Global cooling forced increase in marine strontium isotopic ratios: Importance of mica weathering and a kinetic approach[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 254: 303—312.
- [106] Pettke T, Lee D C, Halliday A N. Radiogenic Hf isotopic compositions of continental eolian dust from Asia, its variability and its implications for seawater Hf[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 202: 453—464.
- [107] Lupker M, Aciego S M, Bourdon B, Schwander J, Stocker T F. Isotopic tracing (Sr, Nd, U and Hf) of continental and marine aerosols in an 18th century section of the Dye-3 ice core (Greenland) [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, 295: 277—286.
- [108] 李锋. 中国北方沙尘源区铅同位素分布特征及其示踪意义的初步研究[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 738—744.
Li Feng. Distribution characteristics of lead isotope in dust source areas and its trace significance in the north of China [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(5): 738—744. (in Chinese with English abstract)
- [109] Sun J, Zhu X. Temporal variations in Pb isotopes and trace element concentrations within Chinese eolian deposits during the past 8Ma: Implications for provenance change[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, 290: 438—447.
- [110] 谢静, 吴福元, 丁仲礼. 浑善达克沙地的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成及其源区意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23: 523—528.
Xie Jing, Wu Fuyuan, Ding Zhongli. Detrital zircon composition of U-Pb ages and Hf isotope of the Hunshandake sandland and implications for its provenance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23: 523—528. (in Chinese with English abstract)
- [111] 付旭东, 杨小平. 中国北方沙漠石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值的初步测定与分析[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 243.
Fu Xudong, Yang Xiaoping. Preliminary measurement and analysis on $\delta^{18}\text{O}$ of quartz in desert in North China[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 243. (in Chinese with English abstract)
- [112] Sun Y B, Tada R J, Chen J, Chen H Z, Toyoda S, Tani A, Isozaki Y K, Nagashima K, Hasegawa H, Ji J F. Distinguishing the sources of Asian dust based on electron spin resonance signal intensity and crystallinity of quartz[J]. *Atmos. Environ.*, 2007, 41: 8537—8548.