

黄土高原地区古气候定量化研究方法评述

宁有丰

1) 西安理工大学,西北水资源与环境生态教育部重点实验室,西安,710048;

2) 中国科学院地球环境研究所,黄土与第四纪地质国家重点实验室,西安,710075

内容提要:定量化重建黄土高原地区古气候,是黄土研究的新方向和大趋势。本文主要从土壤磁化率、植物孢粉、植物硅酸体和稳定同位素等替代性指标方面回顾了国内外对黄土高原地区古气候定量化研究的现状,并对研究中存在的问题进行了讨论。相关的研究表明,黄土高原地区的古气候定量化研究取得了积极的成果,但还仍处在初步阶段。由于指标本身存在局限性或指标与气候要素之间机理尚不十分清楚,所获得的定量化结果并不能令人十分满意。提出今后定量化重建古气候研究的重点是要进一步加强对黄土高原现代生态过程的研究,清楚地认识各指标与气候要素之间的机理和联系,建立可信的相关函数。希望对这方面的研究有所裨益。

关键词:黄土高原;定量化;替代性指标;古气候恢复

黄土高原地区广泛分布着黄土—古土壤沉积序列,这些沉积物很好地记录了晚中新世以来的气候变化和生态演化历史,其中的多种指标已被广泛应用到恢复古环境和古气候的研究当中,取得了令人瞩目的成果(刘东生, 1985; An et al., 1991; Lu et al., 1998; Yu et al., 1998; 孙建中, 2005; Liu et al., 2005a)。然而,在这些研究当中,大部分都是定性化的探讨黄土高原地区的古气候和古环境变化,定量化恢复重建黄土高原地区的古气候一直是国内外学者所关心和考虑的科学问题。

为了定量化探讨黄土高原地区地质历史时期的古气候变化,以往的科研工作者进行了多种尝试,分别利用黄土—古土壤沉积序列中的磁化率、孢粉、稳定同位素、植物硅酸体和其它替代性指标来建立各指标与气候要素之间的相关关系,以期定量化反演黄土高原地区的古气候变化。本文概述了上述替代性指标在古气候定量化研究方面的进展和现状,并对黄土高原地区古气候定量化研究进行了总结和展望。

1 黄土高原地区古气候定量化研究方法概述

1.1 土壤磁化率指标

土壤磁化率指标(Susceptibility)已被用作东亚

夏季风强度的指标,在黄土研究中被广泛应用于指示黄土高原地区的第四纪气候变化,一般来说,高磁化率值对应于相对暖湿的气候条件。

Maher等(1994, 1995)较早地用磁化率指标来定量化反映古降水的变化。Maher等(1994)在黄土高原地区根据降雨梯度沿东南至西北方向采集了9种类型的37个代表性现代土壤样品,测定其磁化率,并与实测的年降水量之间建立了线性相关方程。作者利用该相关方程和黄土—古土壤序列的土壤磁化率值,定量化重建了黄土高原末次冰期—间冰期以来的古降水,并与黄土高原现代降雨量做了对比。Maher等(1995)又以黄土高原中部地区的西峰剖面为例,根据上述方程,利用土壤磁化率值重建了该地区1.1Ma以来的古降水变化。其研究结果显示,在过去1.1Ma以来,约80%时间内该地区的年降水量都要比现在少。

吕厚远等(1994)将土壤磁化率分别与年均温和年降水量联系起来。作者将黄土高原及周边地区63个表层土壤样品的磁化率值与年均温和年降水量分别建立了一元4次回归方程,并利用该回归方程对洛川坡头黄土剖面130ka以来的古温度和古降水进行了计算。Porter等(2001)对中国黄土高原现代代表土的磁化率进行了测定,结果发现,磁化率与年

注:本文为国家重点基础研究发展计划项目(编号2007CB714100)、陕西省自然科学基金(编号2007D02)、中国博士后科学基金(编号20080430543)和黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(编号SKLLQG0611)资助项目的成果。

收稿日期:2009-06-03;改回日期:2009-08-23;责任编辑:章雨旭。

作者简介:宁有丰,男,1979年生。博士,副教授。主要从事地球化学和气候变化研究。Email:yfning@xaut.edu.cn。

均温、年降水量以及年均温和降水量的乘积之间呈现很好的指数相关关系,随着磁化率值的增加,年均温、年降水量以及年均温和降水量的乘积均呈指数增加。

相比其它的指标,土壤磁化率有易于测定的优势。然而,迄今为止对黄土—古土壤磁化率的形成和变化机制尚不是很清楚。就中国黄土类型而言,对古土壤磁化率增强的解释有多种假说:Heller等(1984)认为,是风化过程中由于碳酸盐的淋失以及孔隙度的减少而造成磁性矿物富集;Kukla等(1989)强调黄土和古土壤的物源区不同,干冷期以近源物质为主,暖湿期以远源的细颗粒物为主,这些远源的细颗粒物可能包含火山灰和宇宙尘等高磁化率的物质;Kleteschka等(1995)认为频繁的自然火灾在对土壤矿物的加热过程中导致强磁性矿物的形成;Zhou(1990)和Maher等(1998)先后研究认为,成土过程是土壤磁化率增强的主要原因;贾蓉芬(1996)提出铁细菌和趋磁细菌在土壤磁化率的增强中可能有重要的贡献。所以土壤磁化率指标与季风强度及相应的气候变化关系之间的机制还没有完全弄清楚,这是用磁化率指标来定量恢复古气候所需要解决的主要问题。

1.2 植物孢粉指标

植被是自然界中对气候变化最灵敏的指示物,植被的状况可以在相当大的程度上反映气候状况,因此植物孢粉(Spore and Pollen)与气候之间存在着统计学上的某种相对稳定的数量关系,提取出这种关系就可以利用孢粉的数据直接恢复古气候因子。

在定量解译孢粉资料所反映的气候特征方面,转换函数法是比较成熟的方法。转换函数方法产生于上世纪60年代末,Webb等(1972)利用大量的表土资料和表土点气候资料,将现代花粉和现代气候直接联系起来,通过建立转换函数重建古气候;随后又有不同的学者(Imbrie et al., 1971; Bartlein et al., 1984; Webb et al., 1993)详细讨论了进行花粉—气候转换函数的生物学假设。这种方法的原理是利用表土孢粉资料进行数理统计分析,通过逐步回归分析,建立孢粉—气候因子的转换函数,再将转换函数应用于钻孔的化石孢粉资料中,进而得到古气候参数值。

花粉和气候之间不可能完全是线性关系。为了更准确重建古气候,Bartlein等(1986)提出一种新方法,即花粉—气候响应面方法,它实际上是转换函

数的一种特殊运用。这种方法首先要选取若干有代表性的花粉类型,逐类将现代花粉丰度在地理空间的分布转换为气候空间分布,然后用多次响应面函数的方法,求出该类花粉分布的气候最佳条件时的最高值与极端条件下的最低值,再将化石花粉组合的数据与各种花粉的气候响应面对比,便可量化恢复古气候。

国内,宋长青等(1997a, 1997b)以中国北方215块表土孢粉样品分析结果中的13种花粉类型与4种气候参数(年均温、1月份均温、7月份均温和年降水量)为基础资料,建立了花粉—气候因子转换函数。根据建立的回归方程,作者定量重建了内蒙古中部地区10.0~2.1 ka BP古气候因子数值特征。另外,还有很多研究人员利用花粉—气候响应面方法分别对中国北方、内蒙古、柴达木盆地等地区进行了探讨,量化恢复了上述地区的古气候变化(孙湘君等,1996;王璋瑜等,1997;许清海等,2003;万和文等,2008)。

植物孢粉具有传播广、分布广的特点,是比较容易获取的信息分析载体。同时,由于传播广,给利用化石孢粉推断古环境因子,尤其是定量解译古环境因子也带来了一定的困难。在黄土高原地区,由于孢粉的易扩散性以及孢粉组合的复杂性,再加上黄土中孢粉稀少,孢粉分析仅能从大尺度上展示古植被气候变迁过程,目前还鲜见有利用黄土孢粉记录来量化重建古气候的报道。

1.3 植物硅酸体指标

植物硅酸体(Phytolith)是赋存于植物细胞内的微型蛋白石颗粒,是高等植物生长过程在组织细胞中形成的非晶质 SiO_2 颗粒,大小与花粉相近,一般是无色透明的片状或棱角状碎屑。植物硅酸体在植物死亡、腐烂、分解和埋藏过程中能完好地保存下来,加之其比重大、分散程度低、具原地埋藏的特点和在分类学上的形态差异,在古气候恢复方面显示出重要的作用。

吴乃琴等(1994)分析了全国162块表层土壤样品的植物硅酸体,通过聚类分析和判别分析,并考虑黄土高原地区的气候范围,结合相关的气候资料,建立了植物硅酸体—气候因子(年均温和年均降水量)转换函数。利用该回归方程,作者估算了约3万年以来渭南地区的年均温和年降水量变化,并首次提出黄土高原末次冰消期气候转暖始于14 ka。吕厚远等对中国的植物硅酸体进行了大量深入的研究(吕厚远等,1996; Lü et al., 2006; Lü et al.,

2007)。基于对中国大量表层土壤植物硅酸体样品的分析,作者建立了一个中国植物硅酸体—气候回归模型,利用该模型,结合黄土—古土壤剖面中保存的植物硅酸体信息,作者定量恢复了宝鸡地区 150 ka 万年以来 1 月份、7 月份以及年均降水和温度的变化,并量化探讨了渭南地区 136ka 以来的主要冷干事件。同时,作者认为植物硅酸体指标可以可靠地估算年均降水量、年均温、湿度以及蒸发量的变化。

同一个植物体的不同器官和部位所产生的硅酸体形态可能各不相同,而不同的植物种属也可能产生相似的硅酸体形态,就是同一个植物体上的同一器官和部位,在其生长发育的不同阶段,所产生的硅酸体类型也不尽一致(Rovner, 1986)。植物死亡以后,沉积物中植物硅酸体组合与原生组合之间可能产生变化,再加上植物根系硅酸体的加入以及生物扰动作用等,都可能引起原生组合的变化。这些问题只有在进一步深入工作的基础上才能得到更好地解决。

1.4 土壤有机质碳同位素指标

自然界的陆生植物根据其光合作用路径的不同,一般可以分为以下三类: C_3 植物、 C_4 植物和 CAM 植物(景天酸代谢型)。不同光合作用路径的植物其 $\delta^{13}C$ 值组成存在较大差别, C_3 植物的 $\delta^{13}C$ 值的变化范围在 -32% ~ -20% 之间,平均值为 -27% ; C_4 植物的 $\delta^{13}C$ 值变化范围约在 -15% ~ -9% 之间,平均值为 -13% ;而 CAM 植物的 $\delta^{13}C$ 值变化范围较宽,平均值介于 C_3 植物和 C_4 植物之间,约为 -17% 。(Smith, 1982)。

植物在光合作用过程中,从吸收大气 CO_2 到最终植物有机质的形成都伴随有碳同位素分馏。Farquar(1989)等研究了植物中的碳同位素分馏,认为植物碳同位素的分馏受其生长环境气候因素的影响,温度、水分状况、光照条件、大气 CO_2 状况等都是影响植物 $\delta^{13}C$ 组成的气候因子,并提出了植物碳同位素分馏模式,这是利用土壤有机质碳同位素指标来重建古气候的理论基础。植物在土壤中生长,死亡以后,经过长时间的腐烂,其根、茎、叶等会以土壤有机质(SOM: Soil Organic Matter)的形式进入土壤之中,被保存下来。根据 Farquar(1989)的理论,结合现代生态过程中植物碳同位素组成与相关气候要素之间的相关关系,研究人员尝试利用黄土—古土壤序列中保存的土壤有机质碳同位素信息来量化恢复古降水。

Hatte 等(1999, 2001)将黄土沉积中的土壤有机质的 $\delta^{13}C$ 值应用到量化恢复古降水的研究中。考虑到黄土沉积中土壤有机质形成过程的复杂性以及植被记录环境变化的复杂性,作者假定了 8 个先决条件以简化土壤有机质的 $\delta^{13}C$ 值与古降水的相关关系。运用该相关方程,作者重建了德国莱茵河地区 Nussloch 剖面末次冰期的古降水变化,并与相同地区的其它研究进行了对比。Hatte 等(2005)对 Biome4 植被模型进行了改进,并运用现代生态系统的观测值对模型进行了检验。根据黄土中保存的土壤有机质碳同位素信息和其它相关资料,作者运用改进后的 Biome4 模型量化重建了德国莱茵河谷 Nussloch 剖面 85 ka 以来的古降水变化。

王国安等(2001, 2002, 2003)通过对中国北方 461 个 C_3 植物的 $\delta^{13}C$ 值数据的一元回归分析,作者认为在我国北方黄土区年降水量每增加 100mm, C_3 植被的 $\delta^{13}C$ 平均值将偏负约 0.49‰。Liu 等(2005b)在黄土高原地区沿不同的降水梯度研究了现代生态系统中该地区的四种代表性植被(白羊草、长芒草、胡枝子和狗娃花)的 $\delta^{13}C$ 值变化与降水的相关关系。研究结果显示 C_3 和 C_4 植物的 $\delta^{13}C$ 值均与年降水量呈很好的负相关关系。作者提出,在恢复古生物相对比例时,应该考虑到降水变化对植物本身 $\delta^{13}C$ 值的影响。

Ning 等(2008)根据黄土高原现代自然生态过程的研究结果,确定了土壤有机质的碳同位素组成与年降水量之间的量化关系式,并结合已有的关于黄土高原 C_4 植物的相对比例与年降水量之间的研究结果(An et al., 2005),利用黄土—古土壤沉积序列中保存的土壤有机碳同位素信息,重建了黄土高原东部蓝田和渭南地区的 130ka 以来的古降水变化。在该研究中,作者考虑了降雨对植被类型变化和植物体本身 $\delta^{13}C$ 值变化的双重影响效应,从而相对更准确地建立了土壤有机质 $\delta^{13}C$ 值与年降雨量之间的相关关系。

土壤有机质碳同位素组成与气候变化之间的关系在机制上是比较清楚的,但由于植被转化为土壤有机质过程中可能会产生同位素分馏,以及大气 CO_2 本身浓度和 $\delta^{13}C$ 值变化对植被 $\delta^{13}C$ 值的影响,上述研究都假定了一些不变的条件,简化了量化过程,这些简化会在一定程度上影响最后的量化结果,使得恢复的古降水数据存在一定的误差。因此,在利用土壤有机质碳同位素来量化恢复古气候的研究中,要继续加强现代生态系统的调查数据,

使现代过程的研究更加准确;同时,要加强其它气候条件(尤其是温度)与土壤有机质碳同位素组成变化之间的研究,多因素综合探讨气候变化与土壤有机质碳同位素组成变化之间的相关关系;另外,不同生态条件下植物转化为土壤有机质过程中的碳同位素分馏也需要更进一步的研究。

1.5 其它替代性指标

在黄土高原地区,研究学者还利用其它的一些替代性指标来进行定量化恢复该地区古气候状况的尝试。

在黄土高原东南部渭南地区,孙继敏等(1999)曾利用地球化学参数(游离铁、全铁和碳酸盐)与气候资料之间的转换函数定量化重建了渭南剖面末次间冰期以来的古降水变化。作者采用了 Lü 等(1996)的数学方法,在空间上用统计学方法研究现代土地地球化学成分与现代气候参数(温度、降水)之间的关系,并由此建立起黄土高原及其周边地区表土地地球化学转换函数。在此基础上,将这一转换函数应用到渭南黄土剖面上去,定量化重建了渭南剖面 130ka 以来的古降水和古温度变化。

Zhou 等(2007)利用 ^{10}Be 指标定量化恢复了洛川地区 80ka 以来的古降水变化。作者利用现代降水中的 ^{10}Be 信号,建立了黄土高原地区月平均降雨量与降雨 ^{10}Be 通量的相关方程,结合洛川黄土—古土壤剖面中保存的 ^{10}Be 信息,重建了该地区 80ka 以来的古降水序列。

2 研究展望

如前所述,在黄土高原地区,不同学者分别建立了各种气候代用指标与气候要素(降水量和温度)之间的转换函数关系,并结合黄土—古土壤沉积序列中保存的地质信息,来定量重建黄土高原地区的古气候变化。上述研究在定量恢复古气候历史的研究中作出了积极的尝试和重要的贡献,其基本思路都是一样的,即地质学研究中重要的“将今论古”思想。从现代过程出发,研究现代过程中各替代性指标与各气候要素(降水、温度)之间的相关关系,并以此相关关系为基础,结合黄土—古土壤沉积序列中保存的相关指标的信息,定量化重建黄土高原地区的古气候变化。

但黄土高原地区的古气候定量化研究还处在初步阶段,大多还只是在进行尝试性研究,没有形成可靠的系统方法。上述多种替代性指标,或由于指标本身存在局限性,或由于指标与气候要素之间机理

不清楚,所获得的定量化结果并不能令人十分满意,即便在相同的地质时段,不同的方法重建的古气候也存在差别较大的问题。

土壤磁化率指标的问题在于,黄土—古土壤序列中土壤磁化率的形成和变化机制尚不是很清楚,尚不能从基本理论上解释土壤磁化率与气候指标的相关关系。植物孢粉和植物硅酸体直接来源于植被,植被的生长状况直接受气候的影响,在机理上是清楚的。用植物孢粉指标来定量化重建黄土高原地区的古气候主要问题在于孢粉易扩散、传播广,黄土沉积中保存的孢粉量非常稀少,很难提取,目前还仅能从大尺度上展示古植被气候变迁过程,做到定量化比较难。相对于植物孢粉,植物硅酸体指标是黄土高原地区的定量化研究一个更好的载体,相关的研究进行的也比较多,但也存在一定的问题,重点是对硅酸体形态的分析,以及对其来源的准确判断。同样,土壤有机质碳同位素方法定量化重建古气候在机理上也是比较清楚的,目前主要的问题是植被转化为土壤有机质过程中产生同位素分馏究竟有多大,不同类型的植被是否存在较大差异?另外地质历史时期大气 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化对植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响也应该考虑,应该进一步多因素综合探讨气候变化与土壤有机质碳同位素组成变化之间的相关关系。

迄今为止,在黄土高原地区的古气候定量化研究中,还没有一条标准的降雨量或温度曲线可供参考或对比,因此我们不能简单评价究竟那种方法的重建结果是最真实可靠的。但是,利用黄土—古土壤沉积中保存的地质信息,定量化地探讨和研究黄土高原地区的古气候变化,是黄土研究的新方向和大趋势,这也是古气候和古环境研究的关键和难点。定量化研究的关键在于建立各种指标与气候要素之间转换函数。为了简化计算过程,在实际研究中往往会进行一系列简化,这些简化会影响实际结果的,而要提高研究结果的准度和精度,就需要有更精确的基础数据支撑。因此,必须进一步加强对黄土高原现代生态过程的研究,只有清楚地认识了现代生态过程当中各指标与气候要素之间的机理和联系,才能建立可信的相关函数,这也是今后黄土高原地区古气候定量化研究的重点和难点所在。

参 考 文 献 / References

- 贾善芬, 颜备战. 1996. 陕西段家坡黄土剖面中趋磁细菌特征与环境意义. 中国科学(D辑), 26(5): 411~416.

- 刘东生. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社.
- 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴. 1994. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. 中国科学(B辑), 24(12): 1290~1297.
- 孙建中. 2005. 黄土学. 香港: 香港考古学会出版社.
- 孙继敏, 刁桂仪, 文启忠, 周厚云. 1999. 用黄土地球化学参数进行古气候定量估算的初步尝试. 地球化学, 28(3): 265~272.
- 孙湘君, 王璋瑜, 宋长青. 1996. 中国北方部分科属花粉—气候响应分析. 中国科学(D辑), 26(5): 431~436.
- 宋长青, 吕厚远, 孙湘君. 1997a. 中国北方花粉—气候转换函数建立及应用. 科学通报, 42(20): 2182~2186.
- 宋长青, 孙湘君. 1997b. 花粉—气候因子转换函数建立及其对古气候因子定量重建. 植物学报, 39(6): 554~560.
- 万和文, 唐领余, 张虎才, 李春海, 庞有智. 2008. 柴达木盆地东部 36~18kaB.P. 期间的孢粉记录及其气候环境. 第四纪研究, 28(1): 112~119.
- 王璋瑜, 宋长青, 孙湘君, 程全国. 1997. 中国北方 4 个乔木属花粉—气候响应面模型研究. 植物学报, 39(3): 272~281.
- 王国安, 韩家懋. 2001. 中国西北 C₃ 植物的碳同位素组成与年降水量关系初探. 地质科学, 36(4): 494~499.
- 王国安, 韩家懋, 周力平. 2002. 中国北方 C₃ 植物碳同位素组成与年均温度关系. 中国地质, 29(1): 55~57.
- 王国安, 韩家懋, 刘东生. 2003. 中国北方黄土区 C₃ 草本植物碳同位素组成研究. 中国科学(D辑), 33(6): 550~556.
- 吴乃琴, 吕厚远, 孙湘君, 郭正堂, 刘嘉麒, 韩家懋. 1994. 植物硅酸体—气候因子转换函数及其在渭南晚冰期以来古环境研究中的应用. 第四纪研究, 3: 270~279.
- 许清海, 肖举乐, 中村俊夫, 阳小兰, 杨振京, 梁文栋, 井内美郎, 杨素. 2003. 孢粉资料定量重建全新世以来岱海盆地的古气候. 海洋地质与第四纪地质, 23(4): 99~108.
- An Zhisheng, Kukla G J, Porter S C, Xiao Jule. 1991. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130, 000 years. Quaternary Research, 36: 29~36.
- An Zhisheng, Huang Yongsong, Liu Weiguo, Guo Zhengtang, Steven C, Li Li, Warren P, Ning Youfeng, Cai Yanjun, Zhou Weijian, Lin Benhai, Zhang Qingle, Cao Yunning, Qiang Xiaoke, Chang Hong, Wu Zhenkun. 2005. Expansion of C₄ vegetation in Loess Plateau and stages uplifts of Qinghai—Tibet Plateau. Geology, 33(9): 705~708.
- Bartlein P, Prentice I, T Webb III. 1986. Climatic response surfaces from pollen data for some eastern North American Taxus. Journal of Biogeography, 13: 35~57.
- Bartlein P, Webb T, Fleri E. 1984. Holocene climatic change in the northern midwest: pollen-derived estimates. Quaternary Research, 22: 361~374.
- Farquhar G, Ehleringer J, Hubic K. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 40: 503~537.
- Heller F, Liu Tungsheng. 1984. Magnetism of Chinese loess deposits. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 77: 125~141.
- Hatte C, Antoine P, Fontugne M, Rousseau D D, Tisnerat L N, Zoller L. 1999. New chronology and organic matter $\delta^{13}\text{C}$ paleoclimatic significance of Nubloch loess sequence (Rhine Valley, Germany). Quaternary International, 62: 85~91.
- Hatte C, Antoine P, Fontugne M, Lang A, Rousseau D D, Zoller L. 2001. ^{13}C of loess organic matter as a potential proxy for paleoprecipitation. Quaternary Research, 55: 33~38.
- Hatte C, Guiot J. 2005. Palaeoprecipitation reconstruction by inverse modelling using the isotopic signal of loess organic matter: application to the Nubloch loess sequence (Rhine Valley, Germany). Climate Dynamics, 25(2~3): 315~327.
- Imbrie J, Kipp N. 1971. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology application to a Late Pleistocene Caribbean core. In: Turekian K K. The Cenozoic Glacial Ages. New Haven: Yale University Press.
- Kletetschka G, Banerjee S. 1995. Magnetic stratigraphy of Chinese loess as a record of natural fires. Geophysical Research Letters, 22: 1341~1343.
- Kukla G, An Z S. 1989. Loess stratigraphy in Central China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 7: 203~225.
- Liu Weiguo, Yang Hong, Cao Yunning, Ning Youfeng, Li Li, Zhou Jie, An Zhisheng. 2005a. Did an extensive forest ever develop on the Chinese Loess Plateau during the past 130 ka?: a test using soil carbon isotopic signatures. Applied Geochemistry, 20: 519~527.
- Liu Weiguo, Feng Xiahong, Ning Youfeng, Cao Yunning, An Zhisheng. 2005b. $\delta^{13}\text{C}$ variation of C₃ and C₄ plants across an Asian monsoon rainfall gradient in arid northwestern China. Global Change Biology, 11: 1094~1100.
- Lu Huayu, An Zhisheng. 1998. Paleoclimatic significance of grain size of loess—palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau. Science in China (Series D—Earth Sciences), 41 (6): 626~631.
- Lü Houyuan, Wu Naiqin, Liu Tungsheng, Han Jiamao, Qin Xiaoguang, Sun Xiangjun. 1996. Seasonal climatic variation recorded by phytolith assemblages from the Baoji loess sequence in central China over the last 150000 a. Science in China (Series D—Earth Sciences), 39 (6): 629~639.
- Lü Houyuan, Wu Naiqin, Yang Xiangdong, Jiang Hui, Liu Kambiu, Liu Tungsheng. 2006. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China I: phytolith-based transfer functions. Quaternary Science Reviews, 25: 945~959.
- Lü Houyuan, Wu Naiqin, Liu Kambiu, Jiang Hui, Liu Tungsheng. 2007. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: Palaeo-environmental reconstruction in the Loess Plateau. Quaternary Science Reviews, 26: 759~772.
- Maher B A, Thompson R, Zhou L P. 1994. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: A new mineral magnetic approach. Earth Planetary Science Letters, 125, 461~471.
- Maher B, Roy T. 1995. Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility. Quaternary Research, 44, 383~391.
- Maher B. 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 137: 25~54.
- Ning Youfeng, Liu Weiguo, An Zhisheng. 2008. A 130-ka reconstruction of precipitation on the Chinese Loess Plateau from organic carbon isotopes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 270: 59~63.
- Porter S C, Hallet B, Wu Xihao, An Zhisheng. 2001. Dependence of Near-Surface Magnetic Susceptibility on Dust Accumulation Rate and Precipitation on the Chinese Loess Plateau. Quaternary

- Research, 55(3): 271~283.
- Rovner I. 1988. Macro and micro-ecological reconstruction using plant opal phytolith data from archaeological sediments. *Geoarchaeology*, 3, 155~163.
- Smith B N. 1982. General characteristic of terrestrial plants (agronomic and forests)—C₃, C₄ and Crassulacean Acid metabolism plants. In: Mitsui A and Black C C. eds. *CRC Handbook of Biosolar Resources*, Vol. 1, Part 2. Boca Raton, Florida; CRC Press, 99~118.
- Webb T, Bryson R. 1972. Late and post glacial climate change in the Northern Midwest, USA: Quantitative estimates derived from fossil pollen spectra by multivariate statistic analysis. *Quaternary Research*, 2, 70~115.
- Webb R, Anderson K, Webb T. 1993. Pollen response—surface estimates of late Quaternary changes in the moisture balance of the northeastern United States. *Quaternary Research*, 40: 213~227.
- Yu Ge, Sun Xiangjun, Qin Boqiang, Song Changqing, Li Haiyu, Prentice I C, Harrison P S. 1998. Pollen-based reconstruction of vegetation patterns of China in mid-Holocene. *Science in China (Series D—Earth Sciences)*, 41(2): 130~136.
- Zhou Liping, Oldfield F, Wintle A, Robinson S, Wang J T. 1990. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess. *Nature*, 346: 737~739.
- Zhou Weijian, Alfred P, Warren B, Wu Zhenkun, Chen Maobo, An Zhisheng, Walter K, Xian Feng, Yu Huagui, Liu Lin. 2007. Disentangling geomagnetic and precipitation signals in an 80-kyr Chinese loess record of ¹⁰Be. *Radiocarbon*, 49(1): 139~160.

Methods in Quantitative Reconstruction of the Paleoclimate on the Chinese Loess Plateau

NING Youfeng

- 1) *Northwest Water Resources and Environment Ecology Key Lab. of the Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048;*
- 2) *State Key Lab. of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710075*

Abstract: Quantitative research is necessary for the paleoclimate reconstruction on the Chinese Loess Plateau. Based on the summarizations of the previous researches about quantitative reconstruction of the paleoclimate on the Chinese Loess Plateau, especially in the methods of soil susceptibility, pollen, phytolith, $\delta^{13}C_{org}$, and so on, the existing problems were presented and also discussed. Results show that the quantitative reconstruction of the paleoclimate on the Chinese Loess Plateau is still on the preliminary stage, though lots of positive results have been achieved. Due to the limitations of the indicators or the mechanism between climates and the indicators is unclear, quantitative results obtained are not very satisfactory. For the quantitative reconstruction of the paleoclimate on the Loess Plateau, it is important to study the modern ecologic process further, which would help to realize the mechanisms and relations between the indexes and the climatic factors and to set up the reliable functions and models.

Key words: Loess Plateau; quantitatively; index; reconstruction of the paleoclimate