

甘肃庄浪全新世黄土土壤物源分析及古气候恢复重建

王兆夺¹, 黄春长², 庞奖励², 刘安娜³, 周亚利², 查小春²

1. 黄冈师范学院地理与旅游学院, 湖北黄冈 438000

2. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

3. 石河子大学理学院, 新疆石河子 832003

摘要 通过对六盘山西侧黄土地区进行详细的野外调查,在甘肃庄浪县城北水洛河第三级阶地平坦地面发现出露厚度3 m的全新世风成黄土古土壤剖面。确定以此为基础进行黄土古土壤物源分析及古气候恢复重建研究。在对该剖面土壤与沉积学宏观特征观察分析描述的基础上,从上向下,以每2 cm连续采样,共获得170个样品。在实验室进行理化指标分析和OSL测年、粒度成分端元分析和时间过程小波分析。结果表明,该剖面全新世黄土古土壤中可以识别出4个端元组分。它们分别代表了沉积物沉积后就地风化成壤改造作用、后期的淋溶淀积作用、西北季风和区域北风作用下的沙尘暴沉积作用。其中反应短尺度气候变化比较敏感的端元1组分在时间尺度上呈现出0.3 ka、0.7 ka、1.2ka、1.5 ka、1.8 ka以及2.4 ka的震荡周期。该研究结果对于推动量化分析六盘山西黄土高原全新世黄土古土壤物源和恢复重建该区域气候变化规律具有重要意义,也可为其他地区全新世气候变化过程恢复重建和区域对比提供参考材料。

关键词 全新世;气候变化;风成黄土;粒度;物源;端元分析;小波分析

第一作者简介 王兆夺,男,1984年出生,博士,自然地理,E-mail: joedonwang@163.com

通信作者 黄春长,男,教授,E-mail: cchuang@snnu.edu.cn

中图分类号 P532 S152 **文献标志码** A

0 引言

中国的黄土是由亚洲季风作用下经过漫长的地质历史沉积而成,它比较完整地记载了第四纪以来亚洲季风的强弱变化过程^[1-5]。选取典型的黄土剖面,基于磁化率^[6-10]、粒度^[10-11]和地球化学元素^[12-13]等理化指标,作为古气候重建的重要手段,前人做了大量的工作,取得了显著的效果,但是这些气候指标在重建古气候上依然存在着不足^[14-16],因为黄土作为风动力搬运沉积的产物,在沉积的过程中必然会受到了多种动力的综合作用,多因子作用叠加后无疑给利用黄土古土壤序列精准地反演古气候造成了困难。如果能够把代表不同沉积动力的组分分离出来,可为更加精准地重建古季风信息提供捷径。粒度端元模型是从统计学角度出发,认为一组样品是受到多种物源、多种动力综合作用的条件下形成的产物,任何一个单一的沉积动力(物源特征)组分或者风化改

造动力在沉积物粒度频率曲线上往往反映出某种特定的形态特征,这就可被认为是一个端元组分^[17],而粒度全样频率分布曲线往往是多端元组分的叠加,把不同的端元动力组分分离出来加以单独识别,有利于更加精准的恢复重建区域气候变化过程。

全新世是最年轻的地质年代,也就是最近11.5 ka的时期,相比较第四纪以来大约2.6 Ma的时间跨度来说非常地短暂,但是在这个时期内,对于人类文明的发展至关重要^[18-19],其气候变化过程以及趋势和当前背景最为密切相关,记载的信息也最为完整,由此恢复重建全新世气候变化的信息更为清晰。黄土是地表风动力过程作用下的产物,在沉积的过程中往往受到地形的影响,六盘山作为一道屏障,处于冬夏季风交汇的地带上,对黄土古土壤沉积序列的记录理应比较灵敏,研究六盘山西侧的全新世黄土对于反演季风信息是具有区域代表性的。鉴于此,本文针对六盘山西侧庄浪县水洛河第三级阶地一个

收稿日期:2019-04-15; 收修改稿日期:2019-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41771110);湖北省教育厅项目(19Q187)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771110; The Research Funds for the Hubei Provincial Department of Education, No.19Q187]

典型的全新世黄土古土壤剖面的粒度成分数据进行端元划分,并对最具有古气候代表意义的端元组分进行时间尺度上的小波分析,来识别该剖面所代表的区域上的黄土古土壤物源特征及气候变化信息。

1 研究区概况及剖面划分

庄浪县徐家碾(XJN)剖面(35° 14'36" N, 106° 03'22.4" E)位于六盘山西侧葫芦河支流水洛河第三级阶地面,海拔高程1 705 m,高出河水位65 m。该区域属于黄土高原的西部丘陵沟壑区,总体海拔高程在1 500~2 000 m,年均气温约7.8 °C~8.0 °C,年均降水量约550 mm,光热资源丰富,属于温带半干旱大陆性季风气候。研究剖面从野外宏观上观察,发育

有完整连续的全新世风成黄土古土壤地层,其序列与六盘山以东黄土高原全新世层序和年代框架可以进行对比。同时这里属于东亚冬季风和夏季风锋面的高频交汇地带^[9],所以该区域上的黄土能够比较灵敏地受到季风强弱变化过程的作用,其在冬季风作用下的粉尘堆积和夏季风作用下的成壤改造记载比较完整,剖面所在黄土陡坎高约3~4 m^[20-22]。由此可以认为,本剖面比较完整地记载了全新世季风强弱变化过程(图1)。

对所选取的剖面,以每2 cm从上至下连续采集样品,最终获得沉积样品170个。同时在110 cm、175 cm和280处块状取得释光测年样品3个(图2),对所采集样品带回实验室风干之后加工处理,进行多种理化指标分析。

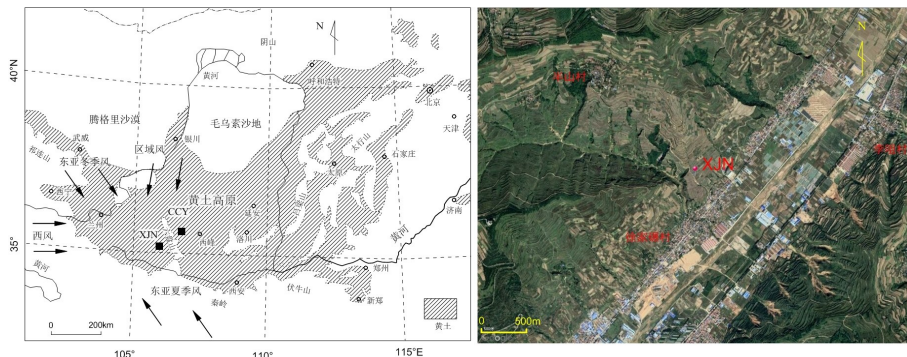


图1 甘肃庄浪县徐家碾(XJN)全新世黄土古土壤剖面位置

Fig.1 The site of the XJN Holocene loess-palaeosol profile in Zhuanglang county of Gansu province

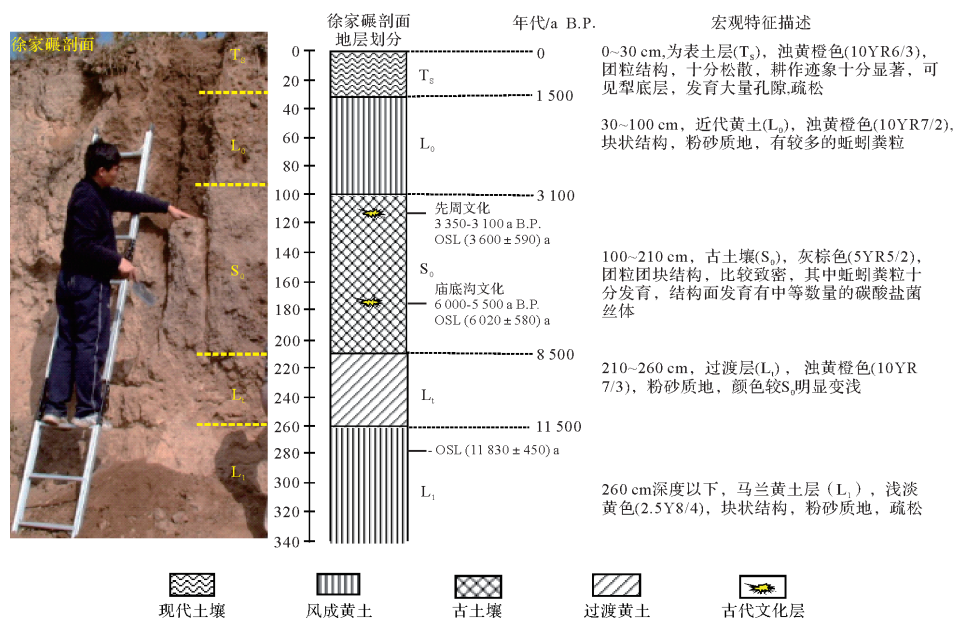


图2 甘肃庄浪县徐家碾(XJN)全新世黄土古土壤剖面地层划分及描述

Fig.2 Stratigraphy and description of the XJN Holocene profile for the loess in Zhuanglang county of Gansu province

2 方法

2.1 理化分析及 OSL 断代

磁化率采用英国 Bartington 公司生产的 MS-2 磁化率仪进行测量。对风干样品在玛瑙研钵中进行粗研磨后,称取大约 10 g 装入无磁性的塑料瓶中进行高频(X_h)和低频(X_l)磁化率的测定,每个样品测定 3 次,取平均值。

粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersize-S 型激光粒度仪进行测量,其测量范围 0.03~1 000 μm ,在上机测试前需进行前处理工作。称取大约 0.5 g 样品,在恒温炉加热的条件下分别用 10% 的 HCl 去除碳酸盐、用 10% H_2O_2 去除有机质,随后加满蒸馏水,静置 72 小时,用吸管吸掉上面的水,反复加水静置三次,等溶液接近中性后再加 30% 的六偏磷酸钠在超声波震荡 10~20 分钟使得颗粒物充分分散后测试。

TOC(总有机碳)采用德国生产 High TOC II 仪器进行的测量。首先称取风干样品大约 5 g,放入玛瑙研钵中研磨至 200 目以下,进一步在 105 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干后,称取 0.15 g 置于样舟中,然后送入燃烧管使得样品中的碳充分燃烧,由此测得样品中总碳(TC)。无机碳(TIC)主要是以 CaCO_3 的形式存在,可用碳酸滴定仪器测得含量。每个样品的全碳(TC)减去其总无机碳(TIC)含量,可得到总有机碳(TOC)的含量。

OSL 断代首先在红光的暗室环境下进行前处理,去除外层曝光部分,加 HCl(10%)和 H_2O_2 (30%)分别去除碳酸盐和有机质,对样品稀释至中性后过筛,选取 63~90 μm 颗粒物进一步用 HF(40%)除去长石,一般搅拌 40 min 左右,进一步用盐酸反应 2 h 左右去除 CaF 等,稀释后在低温条件下烘干,然后把石英颗粒物样品用硅胶涂到钢片上放进 Risø TL/

OSL DA-20 型全自动释光仪进行等效剂量的测量(测试样品需通过 IR 检测),对多个测片剔除最大最小值,取均值。在中国原子能研究院通过中子活化法测得 U、Th、K 的含量环境剂量率,同时在考虑历史平均含水量、宇宙射线等因素的情况下,把各参数输入 Age.2003 软件求得年代数据。

2.2 端元分析

粒度端元分析(EMA, End-Member Analysis)是基于把多物源、多动力等多因子加和作用下呈现出来的粒度全样特征,采用统计学意义加以分离来研究的思想手段。该思想在 1997 年 Weltje^[17]提出了端元组分的概念,基于某一因子作用下,其对应的动力组分往往服从统计学规律(如正态分布),因而可以把一组样品中代表的不同动力组分分解出来加以识别,在此基础上,该方法不断地进行了修正和完善^[23-25],其中 Paterson *et al.*^[25]的改进模型,介绍了 Matlab 背景下基于参数化和非参数化两种方法拟合端元组分,本文采用该模型进行分析。在 Matlab 中运行 AnalySize,导入粒度数据,假定最多端元数为 5 的基础上进行非参数拟合,通过拟合结果(图 3),3 和 4 个端元数相关性不再增加,角度离差来看,4 端元数时角度基本平稳,由此我们可以认为划分出 4 个端元较为合适^[22]。需要说明的是,研究剖面样品在采用参数化端元分析的过程中,各端元组分呈现出良好的参数分布曲线,在剖面深度上表现出平稳的锯齿状变化,和磁化率等其他气候指标没有可对比性,不能呈现出全新世气候冷暖变化的特点,而采用无参数自然状态下拟合的方法,划分出的端元组分含量在深度上的变化和磁化率等其他气候指标可以比较好地对比,并且呈现出更加灵敏变化的特点。

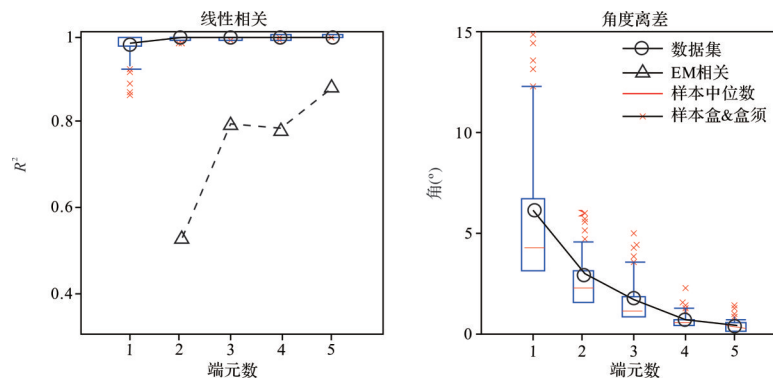


图3 甘肃庄浪县徐家碾剖面端元数线性相关和角度离差

Fig.3 Linear correlation and angular deviation of the end members in Zhuanglang county of Gansu province

2.3 小波分析

小波分析(Wavelet Analysis),也可以叫“小波变换”,是基于傅里叶变换基础上的进一步发展,由于傅里叶变换在短时间尺度频谱分析上具有不能获取信号频谱的局限性,法国的一位青年工程师Morlet提出了小波分析(Wavelet Analysis)方法,该方法能够把一个时间尺度上的信号在不同的连续性时间尺度上进行解析,从而呈现出各不同时间尺度上具有的周期性特点,小波分析提出以来,由于具有明显的优势,从而在各领域上的应用也越来越普遍^[26]。本文采用Matlab软件中进行Morlet小波对数据信号进行小波分析,以获取端元组分含量在时间尺度上的周期性特点。

3 结果和讨论

绘制出研究剖面上所有样品的粒度频率曲线,可以看出其各地层单元间的差异较小,粒度主要分布在粉砂质范围内(图4)。

徐家碾(XJN)剖面属于典型的全新世黄土古土壤剖面,在其形成的过程中受到多种因素综合作用,故采用端元分析的方法来研究问题是可行的。通过对研究剖面的粒度分析结果进行端元分析,可以识别出明显的4个端元组分,从各端元的频率分布曲线特征及在深度上的含量变化(图5,6),结合气候指标,做如下分析:

从四个端元(EM)组分所有样品的归一化频率分布曲线来看,其平均粒径(M_z)从EM1到EM4依次增大;其分选系数(σ)可以反映分选性,分选系数越小,分选性越好,由此可以认为EM2组分分选性最好、EM1次之、EM3和EM4均较差;从偏度系数(Sk)上看来,显示均为负偏特征、各端元组分均呈细尾特点;峰度值(K_g)EM2最大、EM4次之、EM1和EM3相对较小、四个端元(EM)的高频组分均在粉砂质范围(图5、表1)。

通过对徐家碾(XJN)剖面中各端元组分含量、磁化率以及地球化学指标在深度上作对比(图6)。可以看出,EM1组分与磁化率、总有机碳(TOC)、以及海地Mirazoane湖 $\delta^{18}O$ 曲线^[27]形态基本一致,EM4组分含量有和EM1互为消长的变化特点。EM2在上部地层(TS、 L_0 以及 S_0)中含量较低,在下部地层中含量较高,并且和 $CaCO_3$ 含量变化曲线很接近。EM3组分在整个深度范围浮动变化较大,并不受全新世总体大

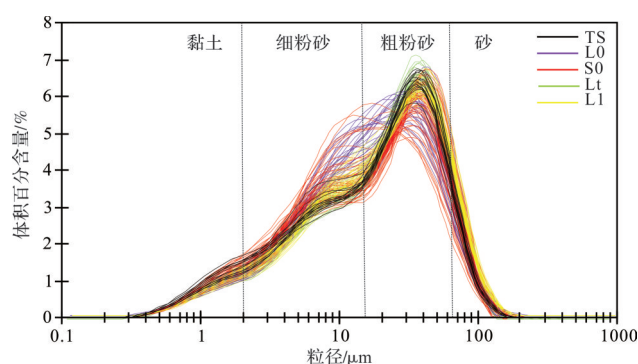


图4 甘肃庄浪县徐家碾(XJN)全新世黄土剖面粒度频率曲线

Fig.4 Grain size frequency curves of the XJN Holocene profile for the loess in Zhuanglang county of Gansu province

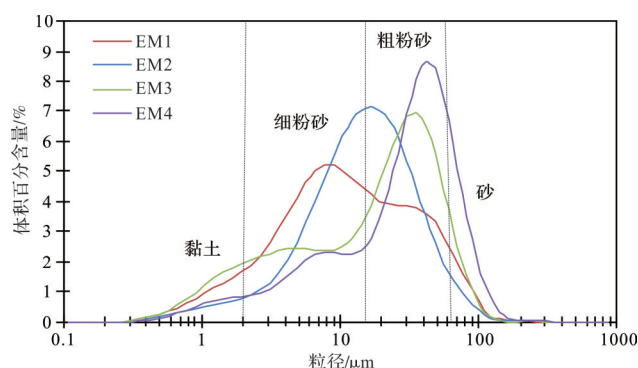


图5 甘肃庄浪县徐家碾(XJN)全新世黄土剖面各端元粒度频率分布曲线

Fig.5 Grain size frequency curves of each end member in the XJN loess profile from the Holocene in Zhuanglang county of Gansu province

气候背景的明显控制。磁化率反映气候指标在机理解释上较为复杂,尚存争议,其值高低往往由诸多因素所控制,但在同一剖面上,其他因素可忽略的情况下,磁化率在垂向上的变化可以作为温湿气候的信息指标,由此也可以作为夏季风的强弱信息^[28-29]。总有机碳(TOC)在黄土中含量的变化受到相应气候环境的控制,和生物成壤作用密切相关^[30]。氧同位素($\delta^{18}O$ 值)在石笋等载体中的曲线特征,指示了古降雨量变化引起氧同位素分馏强弱的信息^[27]。黄土地层中 $CaCO_3$ 含量可以指示其降雨量引起的淋溶作用及其淀积作用^[31]。

通过对比,可以看出EM1应该是一种夏季风强弱变化的信息,在此作用下由降雨量和气温的变化引起对粉尘堆积物(表层原始黄土)进行的风化以及成壤改造作用,在这种作用下,往往使得粉尘颗粒的粒径变小;EM2曲线形态和 $CaCO_3$ 含量曲线形态接

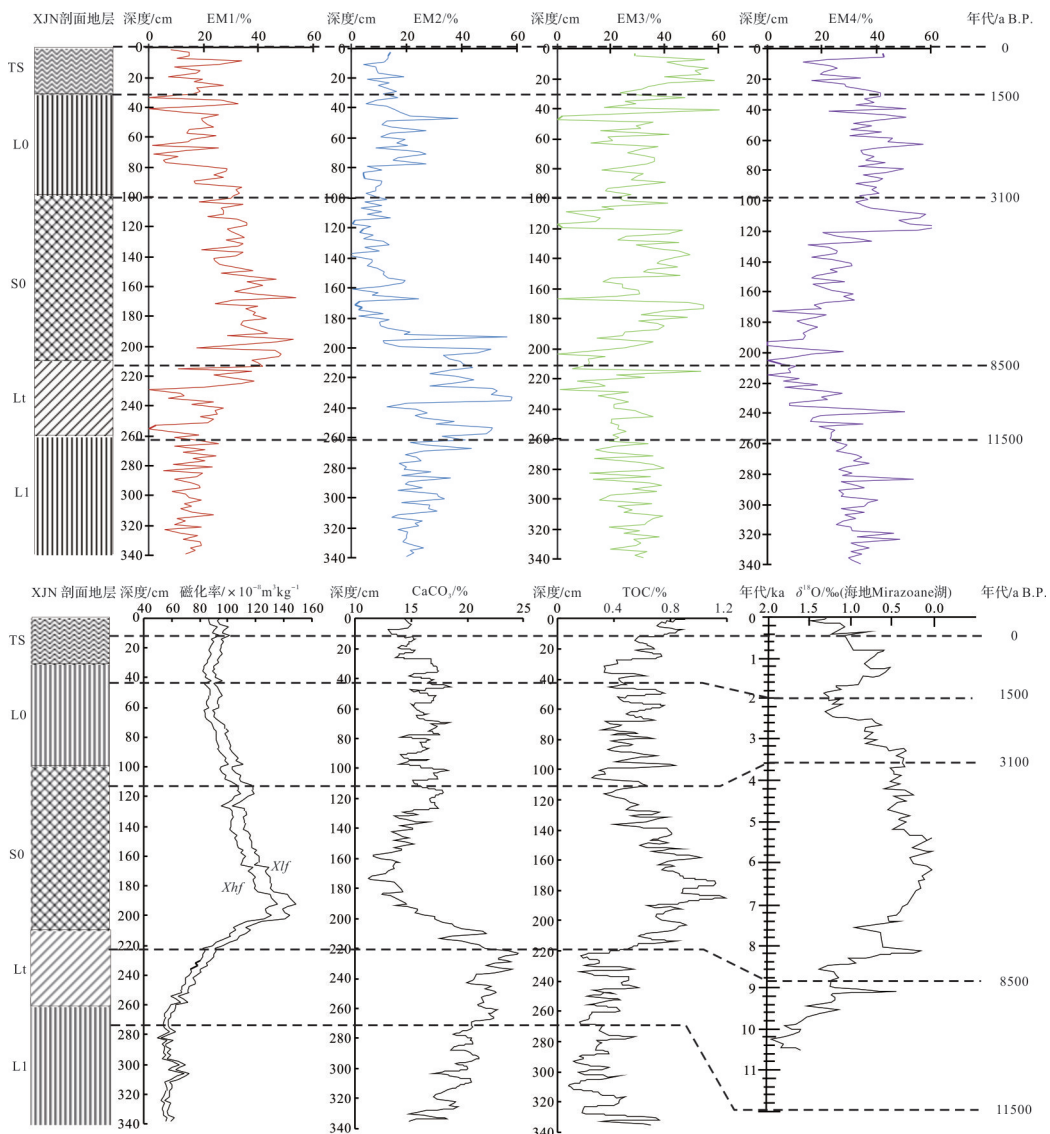


图6 甘肃庄浪县徐家碾(XJN)全新世黄土剖面不同层位各端元百分含量与其他气候指标对比

Fig.6 Content percents of end members in each unit sediment in the XJN profile and the other climate indices in Zhuanglang county of Gansu province

表1 甘肃庄浪县徐家碾(XJN)黄土剖面各端元粒度频率分布曲线参数

Table 1 Parameters of End-Member grain size frequency distribution curves of the XJN loess profile from the Holocene in Zhuanglang county of Gansu province

	$Mz(\mu m)$	σ	Sk	Kg
EM1	9.8	2.9	-0.3	3.0
EM2	14.4	2.7	-0.7	3.8
EM3	15.1	3.7	-0.8	2.5
EM4	21.4	3.3	-1.0	3.3

近,则似乎代表了全新世以来上层土壤中的淋溶作用在下层的淀积作用,随着上层淋溶作用加强,造成

其端元(EM)组分含量的降低,而下层的淀积作用加强,该端元(EM)组分含量亦增多,在此作用下使得粒级分选变好;EM4和EM1曲线在深度变化形态上互为消长关系,EM3组分含量变化随机性高,似乎没有明显的反映季风气候信息,而EM3和EM4的归一化粒度频率分布曲线形态比较接近(图4),也均有细尾特征,由此,结合前人认识,可以认为EM3组分代表了区域风作用下从腾格里沙漠或毛乌素沙地搬运而来近源沙尘暴沉积物,而EM4组分则代表了冬季风作用下从更远的西北荒漠搬运而来的粉尘沉降组分,其中的细尾组分应属于远源粉尘物质^[32]或者(和)在粗颗粒表面吸附的细颗粒粉尘^[10],在端元划分的过

程中由于相关性高而无法识别(图5,6)。由于六盘山对黄土沉积有所阻挡影响,所以徐家碾(XJN)剖面和六盘山东侧的长城塬(CCY)剖面划分有所不同^[22-33](图1)。

总之,从整个剖面上各端元的综合特征来看,各端元组分含量的变化能够灵敏地指示出全新世以来研究区物源组合以及季风演变过程(图6)。

通过对六盘山东西两侧全新世黄土剖面的分析,结果表明^[22,33],端元划分的组分含义上有所差异,在深度尺度上的离散型小波分析划分旋回周期亦不同,反映出沉积厚度分辨率的不同,由此可见,六盘山对在黄土沉降堆积起到明显的阻挡作用。考虑到在该剖面(XJN剖面)比长城塬(CCY)剖面具有更高的分辨率,并没有从时间尺度上开展周期性识别工作,所以本文进一步做以下补充。

在对沉积物粒度全样进行端元分析的基础上,进一步选取最具有季风信息的端元组分含量在全新世时间尺度上进行小波分析(深度尺度转化为年代尺度——借用年代框架在深度上以栅格进行年代插值,其年代分辨率为100 a),显而易见,EM1为东亚夏季风强弱的代用指标来说最具有季风信息的特点,另外,由于时间总尺度为11.5 ka,所以在分析的过程中仅考虑小于5 ka的周期。结果显示,EM1组分含量代表的夏季风强弱在时间尺度上呈现多个较为明显的周期性特征,从小波分析方差结合小波变换图看出,在0.3 ka、0.7 ka、1.2 ka、1.5 ka、1.8 ka以及2.4 ka尺度上端元信号呈现出周期性震荡(图7)。这些周期性和其他学者在其他地区分析的结果基本一致^[34-39]。同时,小波变换图结合分析方差图可以直观

地判断各时间域上的周期性特征、目前所处的状态和相应的时间尺度上未来一段时间的趋势走向。由本文研究认为,端元分析在精准量化古气候信息上具有很好的效果。

基于在黄土高原地区全新世黄土古土壤剖面的系统性工作所建立的地层年代框架,本文研究剖面从野外宏观上的沉积学、地层学以及考古学结合室内光释光断代,界定了本剖面的全新世年代框架。这也是开展研究剖面所代表的区域上物源特征和剖面代表的时间范围内古气候重建工作的前提基础。黄土在缓慢沉降积累的过程中,主要受到冬季风搬运西北荒漠粉尘和夏季风引起的风化成壤改造作用的控制,另外受到高空西风带及区域风等多种动力以及地形地貌多种因素的影响,这样就往往形成黄土高原不同区域上,黄土的物源组成上难免的差异性。当然,量化其物源组成也是黄土研究的一个难点。端元分析方法仅仅是从统计学意义上对物源组成量化研究的尝试。从本文分析结果来看,六盘山西侧的全新世黄土比东侧的沉积要厚,两侧的黄土在物源特征上有一定的差异性,在重建古气候上六盘山西侧的黄土古土壤剖面具有更高的分辨率,所以其效果更好。基于统计学手段的端元分析方法在量化分析物源、沉积动力以及重建古气候上具有很好的效果。

4 结论

(1) 六盘山西麓徐家碾(XJN)全新世黄土古土壤剖面比较完整地记载了全新世季风信息,同时也

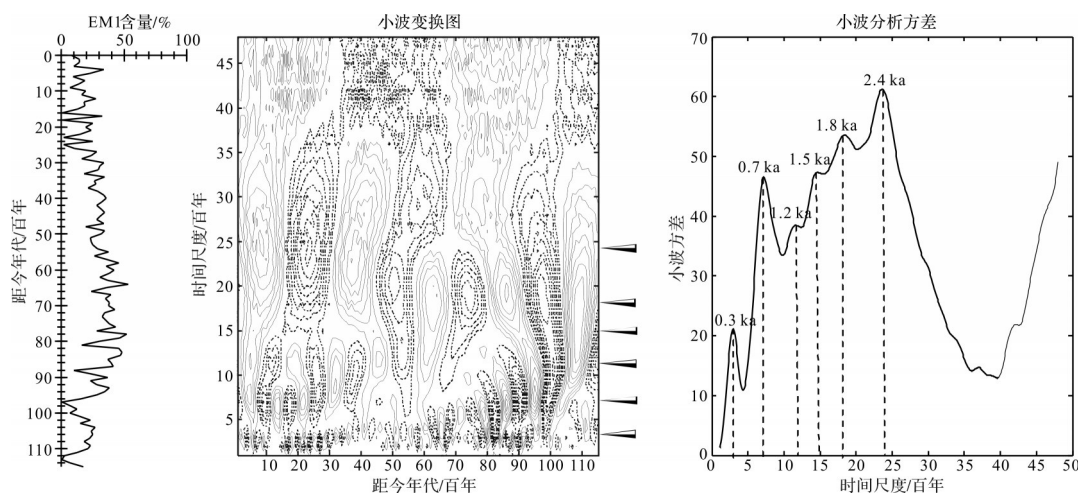


图7 甘肃庄浪县徐家碾(XJN)剖面EM1端元组分含量在时间尺度上的小波分析

Fig.7 Characteristics of the cycle at different scales for EM 1 of the XJN profile in Zhuanglang county of Gansu province

揭示了物源上可能的组合特点。其沉积粒度组分可划分为四个端元(EM):EM1 比较明显地代表了沉积物在沉积之后受到的风化成壤改造作用;EM2 则可能代表了沉积物沉积之后,随着降雨量变化特征下的淋溶作用;EM3 和 EM4 均代表原始沙尘暴沉积物,其细尾可能代表了附着于粗颗粒表面的粉尘物质,或(和)可能代表了高空西风带搬运而来的远源粉尘物质。较长距离搬运且强度受气候背景控制的往往是季风作用,而较短距离搬运且强度不明显受控于气候背景具有随机性变化的可能是属于区域风的作用,故 EM3 较之 EM4 的沉积物在物源上要更近。

(2) 全新世以来,从六盘山西侧的黄土古土壤序列中可以反应出,夏季风强弱在多个不同时间尺度上呈现出准周期性震荡性,总体上分别在 0.3 ka、0.7 ka、1.2 ka、1.5 ka、1.8 ka 以及 2.4 ka 尺度上呈现出周期性震荡。同时,在 0.3 ka 尺度上显示目前处于一个强的状态,未来可能会趋于由强转弱的中间过渡状态。在其他各时间尺度上均显示目前处于一个由强变弱的过渡状态,未来可能为进入一个低值状态,换言之,在六盘山西侧来看,代表夏季风的强度未来是呈减弱趋势的。

致谢 感谢评审专家及编辑老师提出宝贵的修改意见。

参考文献(References)

- [1] 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-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1998, 28(3): 278-283.]
- [2] 丁仲礼,孙继敏,刘东生. 联系沙漠—黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. 中国科学(D辑):地球科学,1999,29(1):82-87. [Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Tungsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1999, 29(1): 82-87.]
- [3] 刘东生,张宗祜. 中国的黄土[J]. 地质学报,1962,42(1):1-14. [Liu Dongsheng, Zhang Zonghu. Chinese loess[J]. Acta Geological Sinica, 1962, 42(1): 1-14.]
- [4] 刘东生,安芷生,文启忠,等. 中国黄土的地质环境[J]. 科学通报,1978,23(1):1-9. [Liu Tungsheng, An Zhisheng, Wen Qizhong, et al. The geological environment of China loess[J]. Chinese Science Bulletin, 1978, 23(1): 1-9.]
- [5] An Z S, Liu T S, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China [J]. Quaternary International, 1990, 7-8: 91-95.
- [6] Heller F, Liu X M, Liu T S, et al. Magnetic susceptibility of loess in China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 103(1/2/3/4): 301-310.
- [7] 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[J]. Quaternary Research, 1991, 36(1): 29-36.
- [8] 吕厚远,韩家懋,吴乃琴,等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学(B辑),1994,24(12):1290-1297. [Lü Houyuan, Han Jiamao, Wu Naiqin, et al. Analysis of the susceptibility and its paleoclimate significance of modern soil in China [J]. Chinese Science: Series B, 1994, 24(12): 1290-1297.]
- [9] 孙东怀,周杰,蒋复初,等. 末次间冰期黄土高原夏季风气候的初步研究[J]. 科学通报,1995,40(20):1873-1875. [Sun Donghuai, Zhou Jie, Jiang Fuchu, et al. Preliminary study on the summer monsoon climate of Chinese Loess Plateau during the last interglacial period[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(20): 1873-1875.]
- [10] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:1-481. [Liu Tungsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-481.]
- [11] 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 the composition of Luochuan Loess [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(1): 66-69.]
- [12] 陈骏,仇纲,鹿化煜,等. 最近130ka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, Lu Huayu, et al. Variation of summer monsoon intensity on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 a: Evidence from Rb and Sr distribution [J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(21): 1963-1966.]
- [13] 陈骏,季峻峰,仇纲,等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学,1997,27(6):531-536. [Chen Jun, Ji Junfeng, Qiu Gang, et al. Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan loess-paleosol sequence, China [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1997, 27(6): 531-536.]
- [14] Sun J M, Liu T S. Multiple origins and interpretations of the magnetic susceptibility signal in Chinese wind-blown sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 180 (3/4): 287-296.
- [15] 丁仲礼,任剑璋,刘东生,等. 晚更新世季风—沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题[J]. 中国科学(D辑),1996,26(5):385-391. [Ding Zhongli, Ren Jianzhang, Liu Dongsheng, et al. The irregular change of the millennium scale of Late Pleistocene monsoon-desert system and its mechanism [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1996, 26(5): 385-391.]
- [16] 李徐生,韩志勇,杨达源,等. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究[J]. 土壤学报,2006,43(1):1-7. [Li Xusheng,

- Han Zhiyong, Yang Dayuan, et al. Ree geochemistry of Xiashu Loess in Zhenjiang, Jiangsu province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 1-7.]
- [17] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [18] Huang C C. Holocene landscape development and human impact in the Connemara Uplands, western Ireland[J]. *Journal of Biogeography*, 2002, 29(2): 153-165.
- [19] Huang C C, Jia Y F, Pang J L, et al. Holocene colluviation and its implications for tracing human-induced soil erosion and redeposition on the piedmont loess lands of the Qinling mountains, northern China[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 838-851.
- [20] Huang C C, Pang J L, Chen S E, et al. Charcoal records of fire history in the Holocene loess-soil sequences over the southern Loess Plateau of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 239(1/2): 28-44.
- [21] 刘安娜, 庞奖励, 黄春长, 等. 甘肃庄浪全新世黄土—古土壤序列元素分布特征及意义[J]. *地球化学*, 2006, 35(4): 453-458. [Liu Anna, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Element distributions of the Zhuanglang Holocene loess-paleosol sequence, Gansu province and its significance[J]. *Geochemica*, 2006, 35(4): 453-458.]
- [22] 王兆夺. 黄河中游—淮河上游全新世黄土土壤粒度与物源关系分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018. [Wang Zhaoduo. Provenance analysis the relationship of the Holocene loess and soil in the Middle Yellow River and Upper Huaihe River[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018.]
- [23] Weltje G J, Prins M A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1/2): 39-62.
- [24] Dietze E, Hartmann K, Diekmann B, et al. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 243-244: 169-180.
- [25] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [26] 郑荣才, 文华国, 李凤杰. 高分辨率层序地层学[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-396. [Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Li Fengjie. High-resolution sequence stratigraphy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 1-396.]
- [27] McDermott F, Frisia S, Huang Y M, et al. Holocene climate variability in Europe: Evidence from $\delta^{18}\text{O}$, textural and extension-rate variations in three speleothems[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(8/9): 1021-1038.
- [28] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [29] An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau[J]. *CATENA*, 1991, 18(2): 125-132.
- [30] 黄春长. 环境变迁[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-191. [Huang Chunchang. Environmental change[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-191.]
- [31] 赵景波. 黄土层中的 CaCO_3 与环境[J]. *沉积学报*, 1993, 11(1): 136-142. [Zhao Jingbo. CaCO_3 and sedimentary environment of loess strata[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11(1): 136-142.]
- [32] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Bimodal grain-size distribution of Chinese loess, and its palaeoclimatic implications[J]. *CATENA*, 2004, 55(3): 325-340.
- [33] 王兆夺, 黄春长, 杨红瑾, 等. 六盘山东麓晚更新世以来黄土粒度指示的物源特征及演变[J]. *地理科学*, 2018, 38(5): 818-826. [Wang Zhaoduo, Huang Chunchang, Yang Hongjin, et al. Loess provenance characteristics and evolution indicated by grain size since Late Pleistocene at the eastern foot of Liupan Mountains, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 818-826.]
- [34] 殷自强, 刘冬雁, 庞重光, 等. 全新世气候变化与太阳活动百年尺度周期分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(7): 112-120. [Yin Ziqiang, Liu Dongyan, Pang Chongguang, et al. The centennial to millennial-scale cycles analysis of Holocene climatic variability and solar activity[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(7): 112-120.]
- [35] Chen F H, Zhu Y, Li J J, et al. Abrupt Holocene changes of the Asian monsoon at millennial- and centennial-scales: Evidence from lake sediment document in Minqin Basin, NW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(23): 1942-1947.
- [36] 靳立亚, 陈发虎, 朱艳. 西北干旱区湖泊沉积记录反映的全新世气候波动周期性变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 101-108. [Jin Liya, Chen Fahu, Zhu Yan. Holocene climatic periodicities recorded from lake sediments in the arid-semiarid areas of northwestern China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 101-108.]
- [37] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates[J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- [38] Sirocko F, Garbe-Schönberg D, McIntyre A, et al. Teleconnections between the subtropical monsoons and high-latitude climates during the last deglaciation[J]. *Science*, 1996, 272(5261): 526-529.
- [39] Campbell I D, Campbell C, Apps M J, et al. Late Holocene~1500 yr climatic periodicities and their implications[J]. *Geology*, 1998, 26(5): 471-473.

Provenance Analysis and Reconstruction of the Climate Change for the Holocene Loess profile in the Zhuanglang Country of Gansu Province, China

WANG ZhaoDuo¹, HUANG ChunChang², PANG JiangLi², LIU AnNa³, ZHOU YaLi², ZHA XiaoChun²

1. Department of Geography and Tourism, Huanggang Normal University, Huanggang, Hubei 438000, China

2. Department of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

3. Department of Geography, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China

Abstract: Through detailed field investigation of the loess area on the western side of Liupan Mountains, a loess paleosol profile with a thickness of 3 m was found on the flat ground of the third-level terrace of the Shuiluo River in northern Zhuanglang county, Gansu province. The paleosol provenance analysis, paleoclimate restoration, and loess reconstruction were determined. Based on the observation and analysis of the macroscopic characteristics of the soil and sedimentology of the profile, 170 samples were obtained from top to bottom and continuously sampled every 2 cm. Physical and chemical index analysis and OSL dating, particle size component end-member analysis, and time-process wavelet analysis were performed in the laboratory. The results show that four endmembers can be identified from the Holocene loess paleosol in the study area, and it represents the weathering and pedogenesis under the action of the East Asian summer monsoon after sediment deposition, the late eluviation dynamic characteristic, northwest winter monsoon, and regional north wind. Furthermore, the summer monsoon end member components on the Holocene time scale with oscillation periods of 0.3 ka, 0.7 ka, 1.2 ka, 1.5 ka, 1.8 ka, and 2.4 ka can be divided on the corresponding time scales. The results of this study are of great significance for promoting quantitative analysis of the Holocene paleosol provenance in the Loess Plateau of the Liupan Mountains and restoring and reconstructing the climate change laws of the region. It can also provide reference materials for the restoration and reconstruction of the Holocene climate change process and regional comparison in other regions.

Key words: Holocene; climate change; loess-paleosol; grain size; provenance; end-member analysis; wavelet analysis