

文章编号: 1000-0550(2012)05-0928-09

新疆伊犁晚全新世风成沙—古土壤序列 磁化率特征及气候变化^①

凌智永¹ 李志忠^{2,3} 武胜利³ 靳建辉² 闫映宇⁴

(1. 中国科学院青海盐湖研究所 西宁 810008; 2. 福建师范大学 地理科学学院 福州 350007;

3. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院 乌鲁木齐 830054; 4. 新疆水土保持与生态环境监测总站 乌鲁木齐 830000)

摘要 选择新疆伊犁河谷塔克尔莫乎尔沙漠古风成沙—古土壤沉积剖面为研究对象,通过73块样品的磁化率及其与TOC、CaCO₃、Fe₂O₃和粒度组成的相关分析,并以OSL测年为时间标尺,讨论剖面沉积的磁化率变化机制及其古气候意义。结果表明:剖面低频磁化率(χ_{lf})与16~250 μm 百分含量为正相关,即低频磁化率 χ_{lf} 变化主要受粗组百分含量变化的影响。其中,古风成沙 χ_{lf} 值多高于古土壤,这与我国季风区沙漠沉积的磁化率变化特征相反。根据剖面磁化率及各种环境指标综合分析,研究区3.7 kaBP以来的气候变化可划分为5个阶段:3.71~3.06 kaBP 凉湿、3.06~2.78 kaBP 冷干、2.78~2.10 kaBP 凉湿、2.10~0.50 kaBP 冷湿、0.50~0.00 kaBP 温干。晚全新世气候变化与周边地区古气候记录有较好的一致性,并与同期北大西洋表层海温变化事件呈现很好的遥相关,总体上表现为相对暖干、凉湿的典型西风气候变化模式。

关键词 风成沙—古土壤 磁化率 晚全新世 气候变化 新疆伊犁

第一作者简介 凌智永 1983年出生 男 硕士 讲师 第四纪环境 E-mail: lingzhiyong@foxmail.com

通讯作者 李志忠 E-mail: lizzfz@163.com

中图分类号 P534.63+2 **文献标识码** A

自从 Heller 和 Liu^[1,2] 等把磁化率作为替代性指标引入中国黄土堆积古气候记录以来,磁化率已经被广泛应用于我国各地黄土—古土壤序列记录的全球对比研究^[3-6],并在第四纪湖泊沉积^[7,8]、河流沉积和风沙沉积^[9-11]古气候记录研究中得到广泛应用。同时很多研究者也指出,不同类型沉积物磁化率的成因机制十分复杂,磁化率值高低变化所反映的古气候环境和动力条件可能因地而异^[12-17]。例如,杨小强等^[7]研究泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性时发现,湖相沉积物磁化率的变化与35~250 μm 间较粗粒物质的含量成正相关,而与0.2~35 μm 细粒物质的含量呈反相关,这种相关性与黄土—古土壤序列磁化率变化特点刚好相反。吕厚远等^[14]对中国现代土壤磁化率与气候(温度、降水)相关性研究表明,黄土高原及周边地区表层土壤磁化率与降水、温度为正相关关系,长江以南为负相关,而在新疆及周边地区却表现出比较复杂的关系。

在我国东部季风气候区,靳鹤龄等^[10]、李明启等^[11]研究了浑善达克沙地全新世古风成沙—古土壤

序列磁化率特征,发现古风成沙的磁化率呈现为低值,古土壤层中磁化率为高值,表现出与我国黄土高原黄土—古土壤序列相似的变化规律。但Feng等^[9]对蒙古北部全新世古风成沙—古土壤序列研究发现,磁化率值变化与靳鹤龄等报道的我国季风区古风成沙—古土壤序列相反,即古风成沙的磁化率呈现为高值,而古土壤的磁化率为低值。关于影响风成沙磁化率高低的成因机制,张家强^[15]比较研究水成沉积、风沙沉积和古土壤磁组构特征后认为,风成沙的磁化率主要受外源碎屑输入控制,同一地区的磁化率值比较稳定。吉云平等^[17]比较了不同类型沉积物磁化率变化特征后指出,风沙沉积的磁化率主要受粒度的影响,因此,风沙沉积物的磁化率可以反映风力的强度和风向的变化,进而可以作为古气候研究时的参考。

在我国西风带气候影响区域,叶玮^[6]、史正涛等^[18]先后研究了新疆伊犁河谷不同海拔高度黄土—古土壤剖面的磁化率变化,也发现低海拔荒漠草原带的黄土—古土壤序列磁化率变化与我国东部季风区黄土—古土壤磁化率变化特征相反,作者对造成这种

^①国家“十一五”科技支撑计划项目(编号:2007BAC15B07)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(编号:200821103)资助。

收稿日期:2011-08-20; 收修改稿日期:2011-12-05

差异的原因进行了初步讨论,认为西风带气候变迁过程中,不同海拔高度的湿度或降水量不同,由此造成黄土和古土壤碳酸盐积累量的差异导致对磁化率的稀释作用不同所致。由于黄土和风成沙属于同源异相的风成相沉积,他们的初步结论对本文深入讨论西风气候带古风成沙—古土壤序列的磁化率变化机制及其古气候意义具有重要意义。但相对我国东部季风区而言,我国西风带干旱区风成沙—古土壤的磁化率及其古气候研究还比较薄弱。

由此可见,新疆全新世气候变化研究是我国全球气候变化研究的热点领域,但在新疆全新世气候环境变化模式以及气候环境替代指标(如磁化率)气候意义解释等方面尚存分歧^[19]。研究指出新疆全新世气候变化,可能与中高纬北大西洋区域的气候变化有着明显的遥相关关系,但这种推论尚缺乏来沙漠区域较高分辨率沉积学记录的支撑。本文选择典型西风带新疆伊犁河谷塔克尔莫乎尔沙漠,通过对沙漠腹地可克达拉剖面(TKP)磁化率变化、成因机制及其古气候意义的分析,并结合光释光(OSL)测年及其区域记录对比,对研究区气候变化序列进行讨论,以期了解晚全新世以来典型西风带新疆沙漠记录的古气候变化特征。

1 沉积环境与剖面概况

1.1 研究区与剖面概况

塔克尔莫乎尔沙漠为典型固定半固定沙漠,地处新疆伊犁河谷西部,西与哈萨克斯坦的穆云佐克沙漠(卡拉库姆沙漠)隔河相望,地理坐标 $43^{\circ}50'00''\sim 44^{\circ}15'40''N$, $80^{\circ}15'00''\sim 80^{\circ}54'30''E$,海拔高度520~630 m。沙漠东西长约40 km,南北宽约15~40 km,面积 4.85×10^4 hm²,是伊犁河谷面积最大的沙漠,占伊犁霍城县土地总面积的9%(图1)。气候类型属于温带半荒漠气候,最热月平均气温 $>22^{\circ}C$,年均气温 $8.4^{\circ}C\sim 9.2^{\circ}C$,年平均降水量200~330 mm,降水季节分配较均匀,无明显干旱季节,春季降水偏多,冬季约有10~25 cm厚度的积雪。全年起沙风(≥ 5 m/s)主要发生在春、夏、秋三季。春季起沙风频率占全年起沙风的33.45%,夏季占21.05%,秋季占17.2%。其中,西南风占总次数的70.87%,西风占18.2%,东风占6.13%,东北风占4.6%,属于典型的西风气候影响区。地带性土壤为灰钙土,非地带性土壤为风沙土,沙漠南部和东南部为以驼绒藜群系(Form. *Ceratoides latens*)为代表的温带半灌木、矮半灌木荒漠,沙

漠西部和中部为以白梭梭群系(Form. *Haloxylon ammodendron*)为代表的温带矮半乔木荒漠,植被覆盖度为40%~75%。粒度分析表明,塔克尔莫乎尔沙漠沙主要由分选较差、负偏值很高的不成熟风成沙构成,是在植被覆盖度较高、输沙势较弱的沉积环境中堆积发育而成的,因此保存了连续的古气候变化记录。

所研究剖面TKP位于霍城至63团公路北侧可克达拉村附近,地理坐标: $43^{\circ}58'13.1''N$, $80^{\circ}32'38.9''E$,海拔605 m(图1)。整个TKP出露3.6 m(未见底),由连续沉积、侧向延伸较广的古风成沙—古土壤序列构成。其中,古风成沙由10层细沙和极细沙层组成,古土壤层由6层沙质土壤、弱成沙质土壤构成。古风成沙和古土壤层厚度不均一,颜色深浅交替变化,古风成沙大多显青灰色、淡棕色,古土壤则呈现灰褐色和灰黑色。古土壤类型为淡灰钙土。

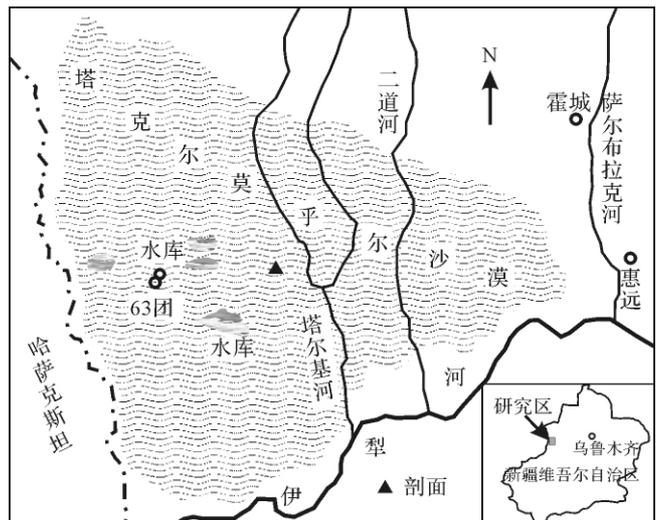


图1 塔克尔莫乎尔沙漠位置及采样点

Fig. 1 The location of Takermohuer desert and the points of samples

1.2 剖面年代以及磁化率与相关指标测量

在TKP深360 cm、210 cm、165 cm处采集了用于光释光(OSL)测年的3块样品,所得测年结果自上而下分别为:(1.88 ± 0.29) ka BP、(2.23 ± 0.19) ka BP、(3.71 ± 0.38) ka BP。基于磁化率年龄模型^[3,20]利用已有的OSL年代数据,分别以0~1.88 ka BP、2.23~3.71 ka BP为控制点计算不同深度的沉积地层年龄;再分别以0~2.23 ka BP、1.88~3.71 ka BP为控制点计算不同深度的地层年龄,对两次计算年龄结果进行内插和外延,建立了近4 ka BP以来

TKP 剖面的年代序列 如图 2。

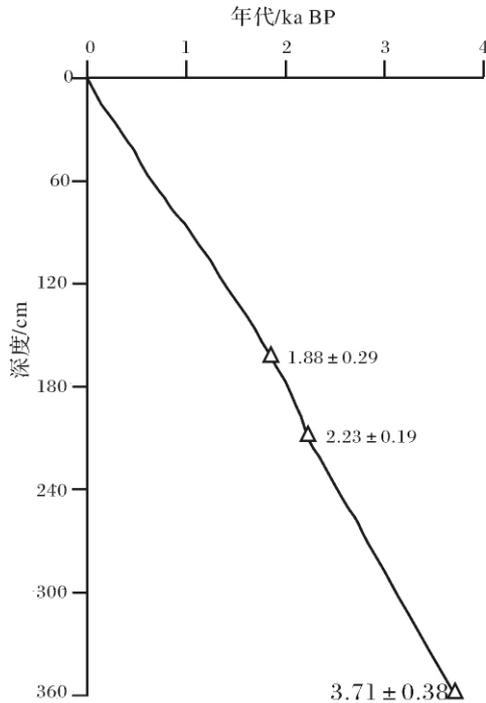


图 2 TKP 地层年代推算图

Fig. 2 The age calculation of TKP stratum

表 1 TKP 不同沉积类型磁化率

Table 1 Magnetic susceptibility of different sediment in section

磁化率	整个剖面	古风沙层	古土壤层
χ_{lf} 范围/ $\text{SI} \cdot \text{g}^{-1}$	3.06 ~ 10.07	3.06 ~ 10.07	3.17 ~ 7.33
均值/ $\text{SI} \cdot \text{g}^{-1}$	6.07	6.58	4.99
CV/%	30.45	28.08%	26.55%
χ_{fd} 范围/%	0 ~ 6.63	0 ~ 2.55	0.18 ~ 6.63
均值/%	1.30	0.75	2.54
CV/%	96.97	83.06	58.32

沿 TKP 剖面自下而上以 5 cm 等间距采集磁化率样品,共采样 73 块。首先将采集的样品自然干燥,在同样的室内环境条件下,用 Denver InstrumentXS-120 型(1/1000)电子天平称重,然后用英国 Bartington 公司生产的 MS-2 磁化率仪对每个样品的频率磁化率(χ_{fd})和低频磁化率(χ_{lf})分别进行 6 次测量,最后计算 6 次测量的平均值(表 2,图 3)。为探讨样品磁化率与粒度组成、有机碳(TOC)、氧化铁(Fe_2O_3)和碳酸盐(CaCO_3)含量之间的关系,本文还分别测定了样品粒度组成、有机碳、氧化铁和碳酸盐含量。其中,粒度分析采用 Master Sizer-2000 激光粒度分析仪进行测试,有机碳采取重铬酸钾—浓硫酸消煮法测定,氧化铁采用日本理学株式会社生产的 3070E-X

荧光光谱仪测定,碳酸钙含量采用容量法测定,分析结果见图 3。

2 磁化率变化特征及成因

2.1 磁化率变化的总体特征

根据 TKP 磁化率测定结果(表 1,图 3),剖面低频磁化率值(χ_{lf})介于 $3.06 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1} \sim 10.07 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值 $6.07 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 30.45%。频率磁化率(χ_{fd})介于 0 ~ 6.63%,平均值 1.30%,变异系数 96.97%。其中,古风沙层(细沙、极细沙)的低频磁化率值(χ_{lf})介于 $3.06 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1} \sim 10.07 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值 $6.58 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 28.08%;频率磁化率(χ_{fd})介于 0 ~ 2.55%,平均值 0.75%,变异系数 83.06%。古土壤层(包括弱成土壤)的低频磁化率(χ_{lf})介于 $3.17 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1} \sim 7.33 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值 $4.99 \text{ SI} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 26.55%;频率磁化率(χ_{fd})介于 0.18 ~ 6.63%,平均值 2.54%,变异系数 58.32%。

总体来看,TKP 剖面的磁化率值高于我国东部季风区沙漠古风成沙的磁化率^[10,11],初步分析可能是由于研究区风成沙源于北部山地火成岩风化产物并经洪积冲积搬运沉积的岩石碎屑,因而磁化率“本底值”较高等因素造成,但整个剖面磁化率变化幅度不大。从变异系数分析,剖面 χ_{fd} 的变化较 χ_{lf} 要大。由于 χ_{fd} 指示了沉积物中细粒粘滞性和超顺磁颗粒的存在,与风化成壤过程关系密切^[13],因此 χ_{fd} 也在一定程度上反映了研究区风沙沉积后成壤环境的波动变化。

TKP 剖面磁化率的峰谷旋回波动明显(图 3),值得注意的是很多沉积段的 χ_{lf} 和 χ_{fd} 变化趋势大致成反位相变化。其中,由表 1 得出古风成沙层的低频磁化率(χ_{lf})均值高于古土壤层,但频率磁化率(χ_{fd})却表现为古土壤层高于古风砂层,即低频磁化率(χ_{lf})变化与我国东部季风区古风成沙—古土壤序列磁化率特征^[10,11]差异较大,而频率磁化率(χ_{fd})变化特征东西部是一致的。

叶玮^[6]、史正涛等^[18]对伊犁河谷不同海拔高度的黄土—古土壤序列磁化率研究也发现,海拔较低的干旱荒漠带黄土—古土壤磁化率(χ_{lf})变化与我国东部季风区相反,而海拔较高的湿润森林—草原带黄土—古土壤磁化率(χ_{lf})变化与季风区相同。由于新疆伊犁河谷的风成沙与黄土同属中亚荒漠区第四纪风成相沉积物,加之本文得出研究区古风成沙与干旱荒漠带黄土—古土壤磁化率变化相似的结果,说明二

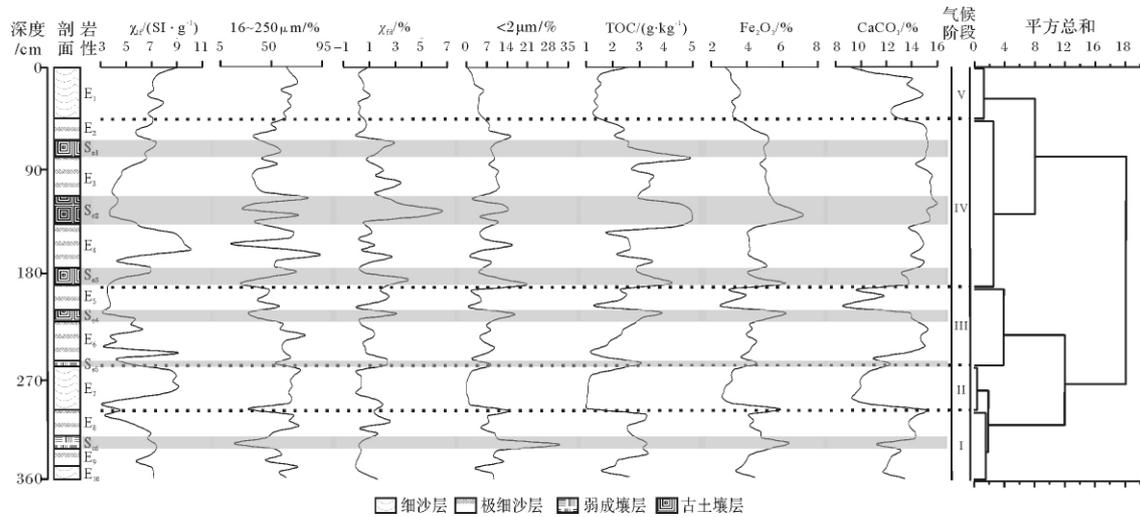


图 3 TKP 剖面磁化率及其相关指标变化曲线

Fig. 3 Change of magnetic susceptibility, grain-size, TOC, Fe₂O₃ and CaCO₃ of TKP section

表 2 TKP 磁化率与其他指标的相关性检验

Table 2 Correlation between magnetic susceptibility and other indexes

指标	TOC/(g·kg ⁻¹)	CaCO ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	<math><2\mu\text{m}</math>/%	16~250 μm/%	χ _{ir}	χ _{fd}
χ _{ir}	-0.354	-0.187	-0.371	-0.188	0.255	/	-0.541
χ _{fd}	0.520	0.300	0.521	0.215	-0.259	-0.541	/

注: 置信水平为 0.01

者受到相似生态气候环境要素的影响, 古风成沙与低海拔干旱荒漠带黄土—古土壤磁化率变化的成因机制可能是相似。

2.2 磁化率变化的气候意义

研究表明, 不同气候区、不同类型的沉积物, 其磁化率变化特征、影响因素和变化机制是很复杂的, 如降水与温度、有机碳含量、氧化铁含量、粒度组成、碳酸盐淋溶强度、成壤过程生成的强磁矿物等^[4-6, 12-17]。为探讨 TKP 剖面磁化率与粒度组成、有机碳和碳酸盐含量之间的关系, 将 TKP 剖面 73 块样品的 χ_{ir}、χ_{fd} 与 TOC、CaCO₃、Fe₂O₃、<math><2\mu\text{m}</math> 粒级与 16~250 μm 粒级含量进行相关分析(表 3)。

相关分析说明: χ_{ir} 与 TOC、CaCO₃、Fe₂O₃、<math><2\mu\text{m}</math> 粒级的百分含量都呈负相关, 置信水平为 0.01; 但 χ_{ir} 与 16~250 μm 粒级的百分含量却表现出了较好的正相关关系, 相关系数为 0.255, 置信水平 0.01。而 χ_{fd} 与 TOC、CaCO₃、Fe₂O₃、<math><2\mu\text{m}</math> 粒级的百分含量都呈正相关, 置信水平为 0.01; 但 χ_{fd} 与 16~250 μm 粒级的百分含量却表现为负相关, 相关系数为 -0.259, 置信水平 0.01。如果对 χ_{ir}、χ_{fd} 两者进行相关分析, 相关系数为 -0.541, 置信水平 0.01。由此表明, 西风

带半荒漠生物气候条件下 TKP 中 TOC、CaCO₃、Fe₂O₃ 和 <math><2\mu\text{m}</math> 粒级百分含量对低频磁化率(χ_{ir}) 值的影响很小。

表 2 相关分析结果也说明, TKP 剖面低频磁化率(χ_{ir}) 的变化主要受 16~250 μm 粗粒级百分含量变化所控制。沈吉等研究^[12] 指出, 当沉积物磁化率与某一粒级组分含量密切相关(正相关) 时, 则说明该粒级组分富含磁性颗粒。因此, 研究区古风成沙低频磁化率高于沙质古土壤, 可能是由于古风沙层富含磁性颗粒的较粗组分造成的。这个推测也符合吉云平等^[17] 研究得出的风成沙磁化率主要受粒度影响的结论。关于粒度与磁化率的相关性, Ozdermir 和 Banerjee^[21] 和 Maher^[22] 将磁铁矿制成不同粒级的颗粒并进行磁学性质测试与分析, 发现磁化率在 125~16 μm(极细砂、粗粉砂) 与 0.03~0.01 μm(细粘滞性与超顺磁颗粒) 各出现一个峰值。在 >1 μm(多畴) 范围内, 125~16 μm 的磁铁矿颗粒的质量磁化率最高, 而在 1< μm 的粒级范围内, 细粘滞性颗粒和超顺磁颗粒(0.03~0.01 μm) 的质量磁化率最高。如上所述, TKP 剖面 <math><2\mu\text{m}</math> 粒级组分没有显示对低频磁化率的增强作用, 表明风成沙细粒组分中的超顺磁性颗

粒(SP)含量较少,而16~125 μm 粒径中的铁磁性矿物(多畴)可能对风成沙磁化率的增高起到了主要作用。Fine等^[23]在研究中国黄土磁性时指出,当频率磁化率 χ_{fd} 小于5%~6%时基本不存在超顺磁性颗粒(SP),而当 χ_{fd} 大于10%表明有相当数量的超顺磁性颗粒。TKP剖面频率磁化率 χ_{fd} 介于0~6.63%,其均值仅为1.30%,即超顺磁颗粒(SP)很少。因此,TKP剖面小于2 μm 粒径组分的百分含量对低频磁化率(χ_{lf})的贡献很小。 χ_{lf} 与 χ_{fd} 的负相关也表明(表2),超顺磁颗粒(SP)在TKP剖面中对风沙沉积 χ_{lf} 的贡献很小。

塔克尔莫乎尔沙漠物质来源于河谷北侧山地剥蚀、近距离搬运的洪积冲积碎屑,以及伊犁河北岸冲积物等冲积碎屑风化产物,在气候变化影响下堆积发育了古风成沙—古土壤沉积序列,其磁化率变化主要受下伏洪积冲积物粗组分铁磁性矿物输入量变化的控制,低频磁化率(χ_{lf})可能指示了物源或粗颗粒磁性颗粒富集的程度,而频率磁化率(χ_{fd})可能指示了在此基础上的成壤程度。叶玮^[6]研究伊犁河谷不同海拔高度黄土—古土壤序列磁化率特征的差异性发现,在较低海拔的荒漠带,在寒冷的冰段西风风力增强,黄土沉积中粉沙含量增加,磁化率为高值,碳酸盐含量相对较低,指示相对高的湿度;温暖的间冰段和冰后期,西风风力减弱,弱成壤作用占优势,碳酸盐积累作用增强,磁化率为低值(相对于冰段),指示湿度降低。

TKP剖面磁化率记录表明,在伊犁河谷低海拔半干旱荒漠环境,古风沙—古土壤序列记录了区域古气候相对干湿和风力强度的交替变化,但风沙沉积对应干旱多风时期,古土壤对应气候比较湿润、风力减弱的时期。风沙堆积时的干旱荒漠环境,沙漠成壤作用几乎停止或很弱,不利于有机质和Ca元素的富集;在古土壤发育期,荒漠草原植被分布扩大,发育沙质灰钙土,Ca元素富集使得碳酸盐含量增加^[2,6,16,17]。在西风气候影响下,降水(湿度)增加时期,气温也较低^[19],这种相对“冷湿”的水热组合,不利于化学风化和生物风化强烈进行,虽然有成壤过程,但成壤强度比较弱,沙质土壤中的粘粒组分、有机质和氧化铁积累较少,因此对低频磁化率的贡献很小。在我国东部季风区,夏季风高温多雨,化学风化和生物风化盛行,风沙沉积的成壤过程强烈,土壤粘粒组分、有机质和氧化铁含量较冬季风干冷时期明显增加^[10,11],同时土壤中碳酸盐大量淋失, χ_{lf} 和 χ_{fd} 也表现出同步升降的变化规律,因此季风区古风沙—古土壤序列和黄

土—古土壤序列磁化率变化所指示的古气候意义一致,但是与西风区古风沙—古土壤序列的磁化率变化规律相反。

伊犁河谷TKP磁化率变化所显示的“冷湿弱风—暖干强风”沉积环境模式是在中纬度西风环流影响下发展的,而北大西洋位于中亚干旱区(包括新疆)西风带的上游,因此北大西洋海温(SST)、北大西洋涛动(NAO)等与新疆年际降水、温度变化密切相关。杨舵等^[24]研究发现,新疆春季降水与SST变化有密切关系。南峰等^[25]、李红军等^[26]研究发现,NAO指数与新疆玛纳斯河、阿克苏河冬季径流量呈现显著的正向变化关系,夏季两者的关系则相反。Böhner J^[27]指出,中西亚干旱区的降水主要来源于北半球中纬度西风从北大西洋带来的水汽,以及位于西风带的内陆湖泊的等水体的水汽。从图4对比可知,TKP剖面磁化率变化与GISP2冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ ^[28]、北大西洋夏季海温^[29]、浮冰碎屑和赤铁矿含量变化曲线^[30]有较多可比性,说明中亚内陆地区的气候变化受西风环流的影响与北大西洋区域的气候变化呈现一定的遥相关。

总之,TKP剖面古风成沙—古土壤序列 χ_{lf} 和 χ_{fd} 反向变化特征,以及 χ_{lf} 风沙层高于古土壤层的变化规律,可能是晚全新世以来中纬度西风带荒漠地区,在风力强弱变化、降水量(湿度)的相对变化与碳酸盐淋溶强度变化相互消长、综合作用的结果。在区域降水量(湿度)增加、风力减弱的“冷湿”期,植被覆盖较好,古土壤较发育、碳酸盐积累增加,磁化率呈现低值;干旱气候期,相对湿度降低、植被减少,成壤作用减弱或停止,碳酸盐积累很少,同时风沙活动强烈、有较多富含铁磁性矿物的粗粒风沙输入,低频磁化率 χ_{lf} 反而呈现高值。研究区TKP剖面磁化率变化规律与我国东部季风区沙漠沉积表现出的差异性,反映了全球气候变化区域响应的差异性,同时也表明磁化率作为替代指标反映区域古气候古环境变化的重要作用。

3 磁化率与相关指标记录的气候变化及其区域对比

综上所述,根据TKP剖面磁化率(χ_{lf})和频率磁化率(χ_{fd})变化特点,以平均粒径(M_z)、粘粒($< 2 \mu\text{m}$)、有机碳(TOC)、碳酸盐(CaCO_3)和氧化铁(Fe_2O_3)五个气候环境替代指标作为变量,对TKP记录的气候变化进行最优分割分析,根据各变量最小误差值确定合理分段数,并结合OSL测年及其内插年

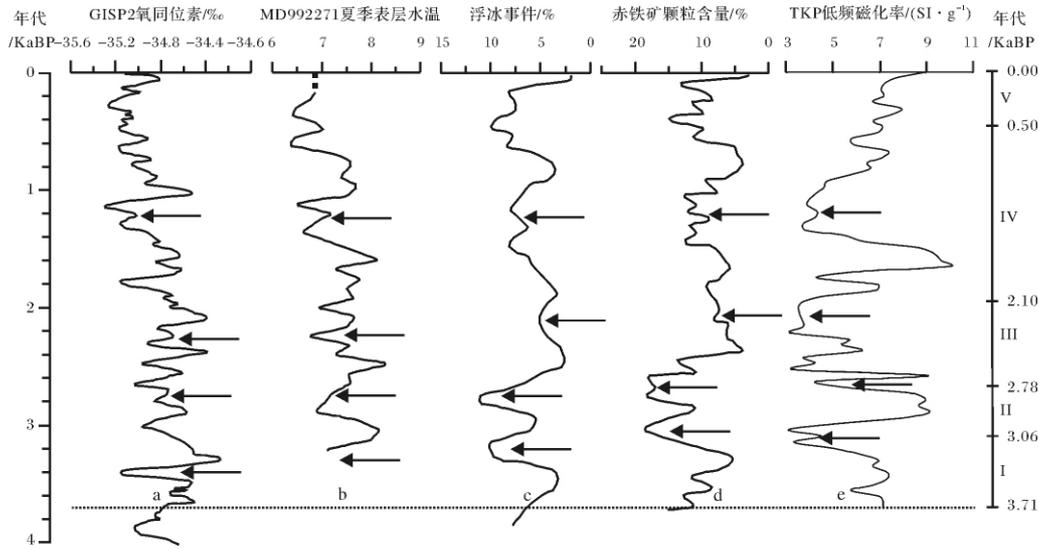


图 4 TKP 磁化率与北大西洋区域气候变化记录的对比

a. GISP2 冰芯 $\delta^{18}O$ 变化曲线^[28]; b. 冰岛 MD992271 夏季表层水温^[29]; c. 北大西洋浮冰碎屑记录^[30]; d. 北大西洋 VM 29-491 赤铁矿颗粒含量变化曲线^[30]; e. TKP 剖面沉积物低频磁化率值

Fig. 4 Comparison diagram of magnetic susceptibility in TKP section and climate change in North Atlantic Ocean

a. The $\delta^{18}O$ record from GISP2^[28]; b. The paleo-sea surface temperature records in summer of core MD992271 on the North Icelandic shelf^[29]; c. d. Increasing ice-rafting and concentration of hematite grains in North Atlantic^[30]; e. χ_{lf} of TKP

代数据,将新疆伊犁塔克尔莫乎尔沙漠晚全新世(3.71 ± 0.38 kaBP)以来的气候变化划分为 5 个阶段(图 3 图 4)。

第 I 阶段: 3.71 ~ 3.06 kaBP χ_{lf} 均值为 6.23 SI · g⁻¹, 16 ~ 250 μm 均值为 54.11%, CaCO₃ 均值为 13.21%。较高均值的 χ_{lf} 磁化率和 16 ~ 250 μm 粗组分含量较高, 以及相关指标反映本阶段剖面所在区域总体为凉湿气候, 以极细沙层为主, TOC 含量也较高, 并发育弱成古土壤 Se6。但有早期温干、晚期凉湿的波动变化。北疆玛纳斯湖沉积记录显示 3 800 ~ 3 500 a BP 出现短时间干旱^[31]。东道海子沉积相也反映 3 500 a BP 以前为湖面下降、磁化率较高、中值粒径相对高值的暖干期, 而 3 120 a. B. P. 之后为湖面上升、磁化率较低、中值粒径相对较低的冷湿气候期^[8]。昆仑山北坡此时的黄土堆积记录为相对凉干的时期^[32]。

第 II 阶段: 3.06 ~ 2.78 kaBP χ_{lf} 均值为 7.21 SI · g⁻¹, 为剖面高值段; 16 ~ 250 μm 均值为 67.45%, 也是剖面高值段; CaCO₃ 均值为 9.94%, 为剖面最低值段。同时, <2 μm 粘粒、TOC 和 Fe₂O₃ 含量均为剖面最低值段, 综合指标反映为温干多风的古气候, 因此沉积了厚层细沙构成的古风成沙层 E7。但在 2 750 aBP 前后发育弱成古土壤 (Se5), 表明有短暂凉

湿波动。北疆古尔班通古特沙漠莫索湾地区记录了 (2 720 ± 210) a BP 的古土壤^[33], 但艾比湖在 2.9 ~ 2.7 ka BP 气候凉爽偏湿^[8, 34]。乌鲁木齐河源大西沟孢粉组合反映为寒冷干燥的古气候^[35], 河源高海拔地区记录为冷湿时期^[36]。昆仑山北坡此时的黄土堆积记录显示为近 5 000 年以来风沙活动最强烈时期^[32]。按 Denton 等^[37]对北半球全新世冰期的研究, 2.4 ~ 3.3 ka B. P 为全新世第三新冰期, 冷峰出现在 2 800 a BP 前后。本剖面古风成沙 E7 可能同步记录了这个干燥气候期。

第 III 阶段: 2.78 ~ 2.10 kaBP χ_{lf} 均值为 4.90 SI · g⁻¹, χ_{lf} 值早期较高、后期明显降低。16 ~ 250 μm 含量均值为 55.53%, CaCO₃ 均值为 12.68%, 两个参数也显示早期较高、后期降低的变化特点。各种综合指标反映以凉湿气候为特色, 因此古风成沙以极细沙为主 (E6, E5), 但可能经历了暖干—相对冷湿—温干的气候变化。其中冷湿期 (2.70 ~ 2.25 kaBP) CaCO₃ 含量很高, 比本段均值高出 1.2% ~ 1.5%, 并发育古土壤 Se4, 后期发育古风沙层 E5。同期, 北疆古尔班通古特沙漠在 (2 720 ± 210) aBP 和 (2 340 ± 140) aBP 发育两次弱沙质古土壤^[33]。艾比湖在 2 400 ~ 2 500 aBP 之前记录为水面积较小、气候偏干的沉积环境^[8, 38]。石河子草滩湖湿地在 2 500 ~ 1 810

cal. a BP (550BC ~ 140AD) 气候较今湿润,为荒漠草原植被^[39]。乌鲁木齐河源则经历了早期凉湿冷湿、后期干暖的气候变化^[36]。

第IV阶段: 2.10 ~ 0.50 kaBP χ_{if} 均值为 5.90 SI · g⁻¹, 出现全剖面最低值段, 16 ~ 250 μm 均值为 49.38%。磁化率等综合指标均反映为明显冷湿气候阶段, 因此风力较弱、以极细沙沉积为主, CaCO₃ 均值为 14.87%, 为全剖面碳酸盐含量的稳定高值区段, 发育三层沙质古土壤 Se3, Se2 和 Se1。TOC 均值为 3.26 g · kg⁻¹, 并在 1200 ~ 1400 aBP 出现峰值段。北疆艾比湖在 2400 ~ 600 cal. aBP 沉积相记录为水面较大、水位较高、气候湿润的时期^[8, 38]。南疆昆仑山北坡此时的黄土堆积显示为持续的相对湿润环境, 且干湿波动缓慢^[32]。如前所述, 本区气候变化直接受到北大西洋海温变化的影响, 因此 TKP 剖面 Se3, Se2 和 Se1 三层古土壤与冰岛北部海域 1900, 1300, 600 cal. aBP 的三次降温事件相对应^[29], 其中最厚古土壤层 Se2 发生时间甚至可能与北大西洋 1400 cal aBP 冰川漂砾碎屑沉积 (IRD) 事件^[30] 相对应(图4)。

第V阶段: 0.50 ~ 0.00 kaBP χ_{if} 均值为 7.41 SI · g⁻¹, 16 ~ 250 μm 均值为 65.52%。CaCO₃ 均值为 12.84%, 总体以凉湿为特点, 但后期趋于暖干。其中, 450 ~ 150 kaBP 的 CaCO₃ 含量相对高值以及 χ_{if} 出现的低值波动, 应是北半球小冰期气候变化的区域响应。最近 100 年来研究区气候趋向暖干, 风沙活动增强。北疆莫索湾(382 ± 101) a BP (即 15 世纪) 剖面也发育有枯枝落叶沉积, 反映了一次短暂相对冷湿波动^[33]。北疆草滩湖湿地 600 ~ 500 a BP 以来(1300 AD 至今) 大多为荒漠景观, 类似现代干暖的气候类型^[39]。叶玮等^[40] 根据树木年轮气候分析指出, 伊犁地区近 300 a 来气候变化和北疆其它地区类似, 在波动中存在着变干趋势。这与本文磁化率等相关指标的综合分析结果是一致的。

4 结论

通过对新疆伊犁塔克尔莫乎尔沙漠 TKP 剖面 3.7 kaBP 以来古风成沙—古土壤序列磁化率及其相关指标的综合研究, 初步结论如下:

(1) TKP 剖面古风成沙—古土壤序列磁化率的平均值总体上较高, 其中频率磁化率与低频磁化率的变化趋势大体相反, 古风沙层的低频磁化率高于古土壤层。所研究剖面的低频磁化率变化特征与伊犁河谷荒漠草原带的黄土—古土壤序列相似, 但与伊犁河

谷高海拔地区草原带的黄土—古土壤序列磁化率变化特征相反。同时 TKP 剖面低频磁化率也与我国东部季风区古风成沙—古土壤序列以及黄土—古土壤序列的磁化率变化规律相反。

(2) 根据相关分析, TKP 剖面古风成沙—古土壤序列的低频磁化率变化, 主要受 16 ~ 250 μm 粒级粗组分含量的影响, 此外碳酸盐积累量增加可能对低频磁化率起到稀释降低作用。研究表明, 在中纬度西风带气候影响下, 荒漠区域风力强弱变化、适宜降水波动(湿度变化)与碳酸盐淀积强度相互消长是影响古风成沙—古土壤序列磁化率变化的主要气候环境要素。干旱半干旱的荒漠环境湿度很低, 成壤作用很弱, 有机质和氧化铁含量对低频磁化率的贡献可能很小。

(3) 依据 TKP 剖面古风成沙—古土壤层磁化率变化及其相关代用指标综合分析, 塔克尔莫乎尔沙漠晚全新世以来的气候演变可以划分为 5 个阶段: 3.71 ~ 3.06 kaBP 为凉湿气候, 3.06 ~ 2.78 kaBP 温干多风, 2.78 ~ 2.10 kaBP 凉湿, 2.10 ~ 0.50 kaBP 为波动变化的冷湿气候, 古土壤发育, 0.50 kaBP 至今接近与现代水平, 气候总体凉湿但后期向暖干发展。区域气候变化主要表现为相对暖干、凉湿冷湿的典型西风气候变化模式。

(4) 依据前人关于沉积物磁化率形成机制的理论研究成果, 并利用实测磁化率(χ_{fd} , χ_{if})与粒度组分、有机质、氧化铁、碳酸盐含量的相关性分析, 对研究区古风成沙—古土壤序列的磁化率变化机制进行了初步分析。但西风带荒漠区古风成沙—古土壤或低海拔荒漠草原区黄土—古土壤沉积物磁化率变化的物理化学成因还不十分清楚, 有机质、氧化铁和外源铁磁性矿物含量对古风成沙—古土壤序列磁化率变化的影响机制还需要更深入的研究。

参考文献 (References)

- Heller F, Liu T S. Magneto stratigraphic dating of loess deposit in China[J]. Nature, 1982, 300: 431-433
- 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 10 [Liu Dongsheng. Loess and Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985: 10]
- Kukla G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility[J]. Geology, 1988, 16: 811-814
- 刘秀铭, 刘东生, Heller F, 等. 中国黄土磁化率与第四纪古气候研究[J]. 地质科学, 1992, 12: 279-285 [Liu Xiuming, Liu Dongsheng, Heller F, et al. Research of magnetic susceptibility of Chinese loess and Quaternary paleoclimate[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992,

- 12: 279-285]
- 5 岳乐平, 薛祥熙, 雷祥义, 等. 近 130ka 中国黄土磁化率气候记录与南极冰芯研究[J]. 地球物理学报, 1998, 41(4): 463-466 [Yue Leping, Xue Xiangxi, Lei Xiangyi, *et al.* Climatic records of Chinese loess susceptibility and of Antarctic ice-core in lately 130 000 a [J]. Acta Geophysica Sinica, 1998, 41(4): 463-466]
 - 6 叶玮. 新疆西风区黄土与古土壤磁化率变化特点[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 380-386 [Ye Wei. Study on magnetic susceptibility of loess and paleosol sequences in Westerly area of Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 380-386]
 - 7 杨小强, 李华梅. 泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 675-679 [Yang Xiaoqiang, Li Hua-mei. The correlation between the content of the different grain-size and magnetic susceptibility in lacustrine sediments, Nihewan basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 675-679]
 - 8 冯晓华, 阎顺, 倪健, 等. 新疆北部平原湖泊记录的晚全新世湖面波动及环境变化[J]. 科学通报, 2006, 51(S1): 49-55 [Feng Xiaohua, Yan Shun, Ni Jian, *et al.* The seiche and environmental evolution in northern plain lake of Xinjiang during late Holocene [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(S1): 49-55]
 - 9 Feng Z D. Gobi dynamic's in the Northern Mongolian Plateau during the past 20 000 a: Preliminary results [J]. Quaternary International, 2001, 76/77: 77-83
 - 10 靳鹤龄, 苏志珠, 孙良英, 等. 浑善达克沙地全新世气候变化[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1532-1536 [Jin Heling, Su Zhizhu, Sun Li-angying *et al.* Holocene climatic change in Hunshandake desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1730-1735]
 - 11 李明启, 靳鹤龄, 张洪, 等. 浑善达克沙地磁化率和有机质揭示的全新世气候变化[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 683-689 [Li Mingqi, Jin Heling, Zhang Hong, *et al.* Climate change revealed by magnetic susceptibility and organic matter during the Holocene in Hunshandak desert [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(4): 683-689]
 - 12 沈吉, 汪勇, 羊向东, 等. 湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史: 以陕西红碱淖湖为例[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 87-92 [Shen Ji, Wang Yong, Yang Xiangdong, *et al.* Regional wind-blown sand characteristics recorded in lake sediments and the lakes' evolution history: the case of Hongjiannao lake in Shaanxi [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 87-92]
 - 13 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, *et al.* Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess [J]. Nature, 1990, 346: 737-739
 - 14 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.* Magnetic susceptibility analysis of and its paleoclimatic significance in China [J]. Science in China: Series B, 1994, 24(12): 1290-1297]
 - 15 张家强, 李从先, 丛友滋. 水成沉积与风成沉积及古土壤的磁组构特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 85-94 [Zhang Jiaqiang, Li Congxian, Cong Youzi. Magnetic fabric characteristics of hydraulic deposit, eolian deposit and paleosol [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(2): 85-94]
 - 16 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: 287-296
 - 17 吉云平, 夏正楷. 不同类型沉积物磁化率的比较研究和初步解释[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 541-549 [Ji Yunping, Xia Zhengkai. Comparison and primarily interpretation of magnetic susceptibilities in different sediments [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 541-549]
 - 18 史正涛, 董铭, 方小敏. 伊犁盆地晚更新世黄土—古土壤磁化率特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 7-10 [Shi Zheng-tao, Dong Ming, Fang Xiaomin. The characteristics of Late Pleistocene loess-paleosol magnetic susceptibility in Yili Basin [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(2): 7-10]
 - 19 安成邦, 陈发虎. 中东亚干旱区全新世气候变化的西风模式——以湖泊研究为例[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 329-334 [An Cheng-bang, Chen Fahu. The pattern of Holocene climate change in the arid central Asia: a case study based on lakes [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3): 329-334]
 - 20 陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 等. 对黄土磁化率、粒度年龄模型的检验(自检)[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 415-420 [Chen Yimeng, Chen Xingsheng, Gong Huili *et al.* Test of the susceptibility and grain-size age models of the Chinese loess (self-test) [J]. Geographical Research, 2006, 25(3): 415-420]
 - 21 Ozdemir O, Banerjee S K. A preliminary magnetic study of soil samples from west-central Minnesota [J]. Earth Planetary Science Letter, 1982, 59: 393-403
 - 22 Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micromagnetites [J]. Geophysical Journal, 1988, 94: 83-96
 - 23 Fine P, Singer M J, Verosub K L *et al.* New evidence for the origin of ferrimagnetic minerals in Loess from China [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 1537-1542
 - 24 杨舵, 史玉光. 新疆春季降水与北大西洋海温关系的事实分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 478-484 [Yang Duo, Shi Yuguang. A preliminary research on relationship between precipitation in spring in Xinjiang and SSTA in northern Atlantic [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 13(4): 478-484]
 - 25 南峰, 李有利, 张宏升. 新疆玛纳斯河径流与北大西洋涛动的关系[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 534-541 [Nan Feng, Li Youli, Zhang Hongsheng. Linking North Atlantic oscillation to stream discharge of the Manas river, Northwestern China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 534-541]
 - 26 李红军, 江志红, 刘新春, 等. 阿克苏河径流变化与北大西洋涛动的关系[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 491-501 [Li Hongjun, Jiang Zhihong, Liu Xinchun *et al.* The relationship between the North Atlantic oscillation and runoff variation of Aksu river in Xinjiang, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 491-501]
 - 27 Böhrner J. General climatic controls and topoclimatic variations in central and high Asia [J]. Boreas, 2006, 35: 279-295
 - 28 Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the 16 500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes

- [J]. Quaternary Research ,1995 ,44: 341-354
- 29 蒋辉,任健, Karen Luise Knudsen, 等. 冰岛北部陆架 3000 年以来夏季表层海水温度及古气候事件 [J]. 科学通报, 2006, 51(22): 2657-2664 [Jiang Hui, Ren Jian, Karen Luise Knudsen *et al.* The temperature of surface sea-water in summer and paleoclimate events of north Iceland shelf during the latest 3000a [J]. Chinese Science Bulletin 2006, 51(22): 2657-2664]
- 30 Gerard Bond, William Showers, Maziet Cheseby, *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. Science, 1997, 278(14): 1257-1266
- 31 林瑞芬, 卫克勤, 程致远, 等. 新疆玛纳斯湖沉积柱样的古气候古环境研究 [J]. 地球化学, 1996, 25(1): 63-72 [Lin Ruifen, Wei Keqin, Cheng Zhiyuan, *et al.* A palaeoclimatic study on lacustrine cores from Manas lake, Xinjiang, Western China [J]. Geochimica, 1996, 25(1): 63-72]
- 32 唐自华, 穆桂金, 陈冬梅, 等. 昆仑山北坡近 5000 年以来黄土堆积的环境信息 [J]. 第四纪研究, 2007, 27(4): 598-606 [Tang Zihua, Mu Guijin, Chen Dongmei, *et al.* Eolian deposits in northern slope of Kunkun Mts and their palaeoenvironmental informations during the past 5000 years [J]. Quaternary Sciences 2007, 27(4): 598-606]
- 33 陈惠中, 金炯, 董光荣. 全新世古尔班通古特沙漠演化和气候变化 [J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 333-339 [Chen Huizhong, Jin Jiong, Dong Guangrong. Holocene evolution processes of Gurbantunggut desert and climatic changes [J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 333-339]
- 34 吴敬禄. 新疆艾比湖全新世沉积特征及古环境演化 [J]. 地理科学, 1995, 15(1): 39-46 [Wu Jinglu. Characters of the evolution of climate and environment during the last 10ka years in Aibi Lake Basin in Xinjiang [J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(1): 39-46]
- 35 Zhang Yun, Kong Zhaochen, Yang Zhenjing. Vegetation changes and environmental evolution in the Urumqi river head, central Tianshan mountains since 3.6 ka BP: a case study of Daxigou profile [J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 655-667
- 36 鞠远江, 刘耕年. 孢粉记录揭示的 4 000 aBP 来乌鲁木齐河源区气候环境变化 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 166-170 [Ju Yuanjiang, Liu Gengnian. Climate and environment changes inferred from pollen records since 4 000 aBP in the headwaters of Urumuqi river, Tianshan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 166-170]
- 37 Denton G H, Karlen W. Holocene climatic variation-their pattern and possible cause [J]. Quaternary Research, 1973, 3: 155-205
- 38 阎顺, 穆桂金, 远藤邦彦, 等. 2 500 年来艾比湖的环境演变信息 [J]. 干旱区地理, 2003, 26(3): 227-232 [Yan Shun, Mu Guijin, Kunihiko Endo *et al.* Environmental evolution information from Aibi Lake since the last 2 500 a [J]. Arid Land Geography, 2003, 26(3): 227-232]
- 39 张芸, 孔昭宸, 倪健, 等. 新疆草滩湖湿地 4550 年以来的孢粉记录和环境演变 [J]. 科学通报, 2008, 53(2): 306-316 [Zhang Yun, Kong Zhaochen, Ni Jian *et al.* Environment changes inferred from pollen records since 4550a BP in Caotan Lake of Xinjiang [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 306-316]
- 40 叶玮, 袁玉江. 新疆伊犁地区现代气候特征与 300 年来的干湿变化规律 [J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 97-103 [Ye Wei, Yuan Yujing. The modern climatic characteristics and dry wet fluctuations in the past 300 years in Yili area, Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(2): 97-103]

Late Holocene Climate Change Revealed by the Magnetic Susceptibility of Palaeoaeolian Sand-Paleosol Sedimentary Sequence in Yili Valley of Xinjiang

LING Zhi-yong¹ LI Zhi-zhong^{2,3} WU Sheng-li³ JIN Jian-hui² YAN Ying-yu⁴

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008;

2. Geography Science College of Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

3. Geography Science and Tourism College of Xinjiang Normal University, Urumqi 830054;

4. Conservation and Environmental Monitoring Central Station of Xinjiang, Urumqi 830000)

Abstract: By studying on correlation between magnetic susceptibility, TOC, CaCO₃, Fe₂O₃ and grainsize component of 73 samples from the paleosand-paleosol sedimentary section of Xinjiang Takermohuer desert, according to OSL date, we discussed mechanism of magnetic susceptibility change and paleoclimate significance. The results were that: The correlation between χ_{lf} and percent content of 16 ~ 250 μm component was positive, coarse component percent content affected the change of χ_{lf} . In the section, χ_{lf} of paleosand is higher than χ_{lf} of paleosol, this characteristic is opposite to magnetic susceptibility of monsoon desert sediment in China. According to magnetic susceptibility and other paleoclimate indexes of section sediment, we divided 5 paleoclimate stages of study area from 3.71 ka BP: 3.71 ~ 3.06 kaBP, the climate was cool and wet, from 3.06 kaBP to 2.78 kaBP was cold and dry, 2.78 ~ 2.10 kaBP was cool wet, 2.10 ~ 0.50 kaBP was cold and wet, 0.50 kaBP to now was warm and dry. Climate change of research area is similar to the other regions during late holocene, and it was related to the temperature change events of surface sea-water in north Atlantic Ocean. The climate change was typical westerly climate model, warm-dry or cool-wet.

Key words: paleosand-paleosol; magnetic susceptibility; late holocene; climatic change; Yili of Xinjiang