

甘肃临洮晚更新世黄土环境变迁

曾方明¹, 向树元¹, 路玉林², 马新民³, 路晶芳¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州 730020

摘要: 对甘肃临洮县塔湾乡晚更新世黄土-古土壤序列的粒度、磁化率两个环境代用指标进行综合分析, 可划分出以下7个气候阶段: (1) 距底1~8.5 m (92.4~78.8 ka), 平均粒径24.42 μm , 平均磁化率 716.8×10^{-6} SI, 年均温度7.8 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量500 mm, 气候温暖较湿; (2) 距底8.5~14.8 m (78.8~65.3 ka), 平均粒径26.83 μm , 平均磁化率为 442.3×10^{-6} SI, 年均温度5.2 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量370 mm, 气候温干; (3) 距底14.8~20.3 m (65.3~57.3 ka), 平均粒径25.94 μm , 平均磁化率 320.7×10^{-6} SI, 年均温度3.5 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量280 mm, 气候温干偏凉; (4) 距底20.3~24.9 m (57.3~47.7 ka), 平均粒径25.23 μm , 平均磁化率 516.4×10^{-6} SI, 年均温度6.0 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量410 mm, 气候温干偏湿; (5) 距底24.9~29.4 m (47.7~40.9 ka), 平均粒径25.46 μm , 平均磁化率 299.4×10^{-6} SI, 年均温度在3.1 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量270 mm, 气候温干偏凉; (6) 距底29.4~34.2 m (40.9~32.4 ka), 平均粒径21.46 μm , 平均磁化率 405.5×10^{-6} SI, 年均温度4.7 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量350 mm, 气候温干偏湿; (7) 距底34.2~39 m (32.4 ka以后), 平均粒径188.89 μm , 平均磁化率 381.1×10^{-6} SI, 年均温度4.4 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量330 mm, 气候温干。这些环境变迁阶段与区域环境变迁具有较好的可对比性, 其中I阶段相当于MIS5温暖期; II阶段和III阶段相当于MIS4降温期; IV阶段、V阶段和VI阶段相当于MIS3的气候温暖期; VII阶段相当于MIS2降温期。但与邻区兰州九洲台和若尔盖RM孔相比, 同时期临夏地区气候明显偏温偏湿。

关键词: 甘肃临洮; 晚更新世; 黄土; 环境变迁。

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2007)05-0703-10

收稿日期: 2007-06-16

Environmental Evolution of Late Pleistocene Loess Deposits at Lintao County, Gansu Province

ZENG Fang ming¹, XIANG Shu yuan¹, LU Yu lin², MA Xin min³, LU Jing fang¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100029, China

3. Northwest Branch of the Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020, China

Abstract: According to the comprehensive analysis of granularity and magnetic susceptibility of late Pleistocene loess paleosol sequence at Tawan, Lintao County, Gansu Province, the climate change in this area can be divided into seven phases. (1) 1–8.5 m above the bottom (92.4–78.8 kaBP); the average value of particle diameter and magnetic susceptibility was 24.42 μm and 716.8×10^{-6} SI, and the annual average temperature and precipitation reached to 7.8 $^{\circ}\text{C}$ and 500 mm, being the highest of the seven phases, indicating warm and wet climate. (2) 8.5–14.8 m above the bottom (78.8–65.3 kaBP); the average value of particle diameter and magnetic susceptibility was 26.83 μm and 442.3×10^{-6} SI, and the annual average of temperature and precipitation was about 5.2 $^{\circ}\text{C}$ and 370 mm. The climate was tepid and dry. (3) 14.8–20.3 m above the bottom (65.3–57.3 kaBP); the mean of particle diameter and magnetic susceptibility was 25.94 μm and 320.7×10^{-6} SI, and the annual average temperature and precipitation was about 3.5 $^{\circ}\text{C}$ and 280 mm. The climate changed to be mild dry and slightly cool. (4) 20.3–24.9 m above the bottom (57.3–47.7 kaBP); the average value of particle diameter and magnetic

基金项目: 中国地质调查局综合研究项目(No. 1212010610103); 中国地质调查局区调项目(No. 20041300007)。

作者简介: 曾方明(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质研究。E-mail: zengfangming2007@163.com

susceptibility was $25.23 \mu\text{m}$ and $516.4 \times 10^{-6} \text{SI}$, and the annual average temperature and precipitation reached $6.0 \text{ }^\circ\text{C}$ and 410 mm . It was mild dry and slightly wet. (5) $24.9 - 29.4 \text{ m}$ above the bottom ($47.7 - 40.9 \text{ kaBP}$): the mean of particle diameter and susceptibility was $25.46 \mu\text{m}$ and $299.4 \times 10^{-6} \text{SI}$, and the annual average temperature and precipitation was $3.1 \text{ }^\circ\text{C}$ and 270 mm . The climate was mild dry and slightly cool. (6) $29.4 - 34.2 \text{ m}$ above the bottom ($40.9 - 32.4 \text{ kaBP}$): the average value of particle diameter and susceptibility was $21.46 \mu\text{m}$ and $405.5 \times 10^{-6} \text{SI}$, and the annual average temperature and precipitation was about $4.7 \text{ }^\circ\text{C}$ and 350 mm . It was mild dry and slightly wet. (7) $34.2 - 39 \text{ m}$ above the bottom (after 32.4 kaBP): the average value of particle diameter and susceptibility was $188.89 \mu\text{m}$ and $381.1 \times 10^{-6} \text{SI}$, and the annual average temperature and precipitation was about $4.4 \text{ }^\circ\text{C}$ and 330 mm . The climate was warm and dry. There shows a high comparability between these climate changes in the studied area and the regional environmental evolution. Phase I corresponds to the warm MIS (marine isotope stage) 5; Phase II and III correspond to the cooling MIS4; Phase IV, V and VI correspond to the warm MIS3; Phase VII corresponds to the cooling MIS2. Compared with adjacent areas like Jiuzhoutai in Lanzhou Province and core RM in Zoige, the climate is obvious warmer and wetter in Linxia during the same period.

Key words: Lintao County, Gansu Province; late Pleistocene; loess; environmental evolution.

0 引言

全球变化是当今国际科学界瞩目的前沿课题。目前,国际地圈-生物圈计划(IGBP)是国际科学联合会正在组织实施的国际性全球变化研究计划之一,其核心项目之一即是“过去全球变化的研究(PAGES)”(Global Change(IGBP) Report No. 19, 1992)。而第四纪是地球发展史上最新的一页,气候发生急剧的冷暖变化,研究这一地质时期的地球环境变化规律,分析古环境变迁,探索古气候的动力机制,意义深远。

广泛分布于中国西部且连续沉积的黄土保存有很好的古气候古环境记录,黄土-古土壤序列所记录的多旋回气候波动与深海沉积物氧同位素所记录的全球冰量变化密切相关,是全球气候变化的重要组成部分(刘东生, 1985)。通过对作为冬季风替代指标的粒度、粉尘能量、碎屑石英粒度等,以及作为夏季风替代指标的磁化率、化学风化指数、碳酸盐含量等的研究,提示出黄土-古土壤序列也是亚洲季风系统的良好记录(丁仲礼等, 1998; 鹿化煜和安芷生, 1998; 谢远云等, 2002; 吕连清等, 2004; 陈一萌等, 2004a; 王建力等, 2005)。前人研究表明,粒度和磁化率等代用指标是研究黄土-古土壤序列的环境变迁的重要手段。

研究区地处临夏盆地,为青藏高原与黄土高原衔接带上一个新生代断陷盆地,处于东部季风区、西北干旱区及青藏高原高寒区三大自然带的交汇地带,是第四纪气候变化非常敏感的地区(Li *et al.*, 1988; 宋春晖等, 2005),本文通过对晚更新世风成黄土的粒度和磁化率等环境代用指标分析,建立了该地区晚更新

世环境演变过程,从而为揭示中国西部黄土地区和青藏高原晚更新世环境变迁提供了新的资料。

1 剖面位置、沉积序列和沉积年龄

甘肃临洮塔湾黄土剖面(剖面编号 P53)为一天然垂直黄土剖面,位于甘肃临洮县塔湾乡,312国道临洮-定西段公路旁,起点坐标:经度 $103^\circ 57.59' \text{E}$, 纬度 $35^\circ 38.16' \text{N}$,海拔高程 2140 m 。

剖面露头经人工挖掘处理后较为良好,实测厚度 39 m ,下部为新近纪毛沟组(Nm)桔红色含砾粉砂质泥岩,上部为晚更新世风成黄土,其中黄土有 11 层,古土壤有 11 层, 39 m 以上约 2 m 厚,因人为耕作扰动剧烈故未测制。整个剖面沉积连续、无间断。剖面自下而上测制。在第 16 层距底 25.2 m 处、第 20 层距底 34.4 m 处采集了 2 件光释光年龄样品,测得 OSL 年龄分别为 $(48.5 \pm 4.5) \text{ ka}$ 、 $(31.8 \pm 3.3) \text{ ka}$ 。假定沉积速度为常数,根据上部两个年龄计算出的沉积速率进行推算,可以估计出剖面不同位置的沉积年龄,如第 1 层底部(距底 1 m 处)年龄约为 92.4 ka ,第 6 层底部(距底 8.5 m 处)年龄约为 78.8 ka 。整个剖面沉积时代为晚更新世,属马兰黄土。

2 粒度分析与环境变迁

2.1 样品采集与分析

以约 80 cm 间距连续采集粒度分析样品,共采集样品 48 件。测试分析在中国地质大学(武汉)湖北省表层系统开放实验室激光粒度分析室完成,所用仪器为 Backham Coulter 公司 LS230 型激光粒度

仪, 仪器测量范围为 $0.04 \sim 2000 \mu\text{m}$, 误差小于 2% 。由激光粒度仪自动分粒级得出各粒级百分含量数据, 对该百分含量数据进行各种计算后, 可作出沉积物的粒度变化曲线。

2.2 测试结果

粒度分析结果表明(表 1), 样品粒度总体较细, 粉砂占绝对优势, 其中粗粉砂含量在 $30.4\% \sim 62.3\%$ 之间, 平均含量为 56.7% , 是主体组分; 细粉砂含量在 $6.55\% \sim 18.6\%$ 之间, 平均含量为 13.7% ; 粘粒含量在 $7.55\% \sim 25.6\%$ 之间, 平均含量为 18.6% ; 砂粒含量最少, 平均含量为 11.0% , 总体粒度显示属典型“黄土粒组”。经计算, 黄土的平均粒径、中值粒径及标准偏差(分别为 $45.08 \mu\text{m}$, $22.87 \mu\text{m}$, $54.65 \mu\text{m}$) 皆大于古土壤(分别为 $21.98 \mu\text{m}$, $16.58 \mu\text{m}$, $19.97 \mu\text{m}$)。Kd 比值介于 $2.07 \sim 4.18$ 之间, 平均为 3.14 , 其中黄土为 3.28 , 古土壤为 2.85 , 可见黄土形成时气候明显比古土壤形成时更干冷。

2.3 粒度特征及古环境意义

本剖面中粒度组分较单一, 以粗细粉砂占绝对优势。从下到上沉积物粒度变化较大。分布峰度较高、分选较好的粗粉砂组分, 是黄土的主要组成部分, 可能代表了冬季风盛行时近距离、低空搬运的粉尘物质, 指示了东亚冬季风环流的强度(孙东怀等, 2000)。

根据塔湾剖面黄土沉积物粒级 $< 5 \mu\text{m}$ 、 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 、 $> 50 \mu\text{m}$ 颗粒的百分含量以及平均粒径、中值粒径、标准偏差在剖面上的曲线变化(图 1), 可划分为 7 个环境变化阶段:

I 阶段: 距底 $1 \sim 8.5 \text{ m}$, 沉积物粒度较细, 平均粒径最大值为 $24.96 \mu\text{m}$, 最小为 $14.81 \mu\text{m}$, Kd 值最大值为 3.57 , 最小为 2.47 , 粘粒含量平均为 20.03% 。粒径整体变化趋势为粘粒含量逐渐增大, 粗粉砂含量逐渐减小, 表明末次间冰期期间, 气候变得温暖较湿。而且, 其间还出现了一次粒度变粗现象。

表 1 甘肃临洮塔湾剖面黄土 - 古土壤序列粒度分析结果

Table 1 Granularity analysis results of the loess paleosol sequence at Tawan, Lintao County, Gansu Province

样号	颗粒含量(%)				平均粒径 (μm)	中值粒径 (μm)	标准偏差 (μm)	Kd 比值
	$< 5 \mu\text{m}$	$5 \sim 10 \mu\text{m}$	$10 \sim 50 \mu\text{m}$	$> 50 \mu\text{m}$				
LD22 1	7.55	6.55	30.4	55.5	253.8	59.69	334.3	4.03
LD21 2	11.0	10.9	43.2	34.9	111.2	32.06	201.1	3.93
LD21 1	11.3	10.5	44.2	34.0	107.4	31.81	196.8	3.91
LD20 1	8.0	7.2	33.4	51.4	283.1	50.57	426.0	4.18
LD19 3	18.8	13.5	59.7	8.0	23.77	18.95	19.31	3.18
LD19 2	20.8	15.7	58.7	4.8	20.79	16.23	17.00	2.82
LD19 1	20.0	15.1	58.9	6.0	21.92	17.04	18.00	2.95
LD18 1	19.6	14.7	58.4	7.3	23.17	18.45	18.68	2.98
LD17 2	22.1	16.7	58.2	3.0	19.42	15.05	15.90	2.63
LD17 1	22.9	17.2	54.6	4.3	19.69	14.49	17.55	2.38
LD16 6	20.9	15.4	54.7	9.0	35.98	16.54	94.11	2.62
LD16 5	23.2	15.4	54.9	6.5	21.55	16.21	18.26	2.37
LD16 4	20.8	14.9	58.0	6.3	22.21	17.55	17.93	2.79
LD16 3	19.6	14.2	57.7	8.5	23.66	18.68	19.32	2.94
LD16 2	20.0	13.1	57.0	90.0	24.81	19.58	21.01	2.85
LD16 1	18.3	12.8	60.4	8.5	24.54	20.76	18.87	3.30
LD15 2	22.2	16.6	58.9	2.3	18.88	14.94	15.91	2.65
LD15 1	25.6	18.6	53.0	2.8	17.83	12.81	17.60	2.07
LD14 3	17.3	12.5	55.5	14.7	42.85	22.22	81.62	3.21
LD14 1	17.4	13.2	59.9	9.5	24.71	20.42	19.22	3.44
LD13 1	19.2	15.2	59.6	6.0	21.89	17.10	18.37	3.10
LD12 1	17.3	12.9	58.7	11.1	26.20	21.21	21.88	3.39
LD11 1	16.3	11.9	61.7	12.1	26.93	22.87	21.09	3.79
LD10 5	15.9	11.6	61.3	11.2	26.58	23.42	19.87	3.86
LD10 4	16.0	11.7	61.2	11.1	26.58	23.33	20.01	3.83
LD10 3	16.8	12.4	62.3	8.5	24.94	21.60	18.53	3.71

续表 1

样号	颗粒含量(%)				平均粒径 (μm)	中值粒径 (μm)	标准偏差 (μm)	Kd 比值
	< 5 μm	5~10 μm	10~50 μm	> 50 μm				
LD10 2	17.0	12.9	62.0	8.1	24.43	20.61	18.39	3.65
LD10 1	19.4	14.2	59.2	7.2	22.59	17.88	18.18	3.05
LD9 1	19.0	14.1	57.8	9.1	23.73	18.36	19.86	3.04
LD8 3	19.1	13.4	56.8	10.7	24.88	19.61	20.36	2.97
LD8 2	20.0	14.4	58.0	7.6	22.67	17.76	18.50	2.90
LD8 1	19.0	13.9	61.1	6.0	22.53	18.49	17.50	3.22
LD7 1	20.3	16.1	61.7	1.9	19.39	15.85	15.01	3.04
LD6 4	19.5	15.1	61.7	3.7	20.87	16.97	16.19	3.16
LD6 3	17.0	12.4	61.7	8.9	24.93	21.37	19.05	3.63
LD6 2	17.7	12.4	49.1	20.8	42.99	22.69	57.52	2.77
LD6 1	15.3	11.5	52.6	20.6	43.67	25.52	61.93	3.44
LD5 1	18.6	14.1	50.6	16.9	44.46	18.71	68.81	2.72
LD4 1	20.1	13.7	56.2	10.0	28.26	18.51	36.63	2.80
LD3 5	21.6	16.3	60.0	2.1	18.97	15.49	15.12	2.78
LD3 4	23.0	16.5	56.8	3.7	19.21	14.81	16.38	2.47
LD3 3	21.3	15.8	59.5	3.4	19.87	15.84	16.11	2.79
LD3 2	20.7	15.1	61.5	2.7	20.13	16.78	15.69	2.97
LD3 1	19.6	13.5	58.5	8.4	23.61	18.96	19.33	2.98
LD2 1	16.7	11.0	59.6	12.7	27.6	24.96	20.67	3.57
LD1 2	20.6	14.2	64.3	0.9	19.95	17.83	14.59	3.12
LD1 1	18.1	13.8	64.3	3.8	22.17	19.12	18.88	3.55

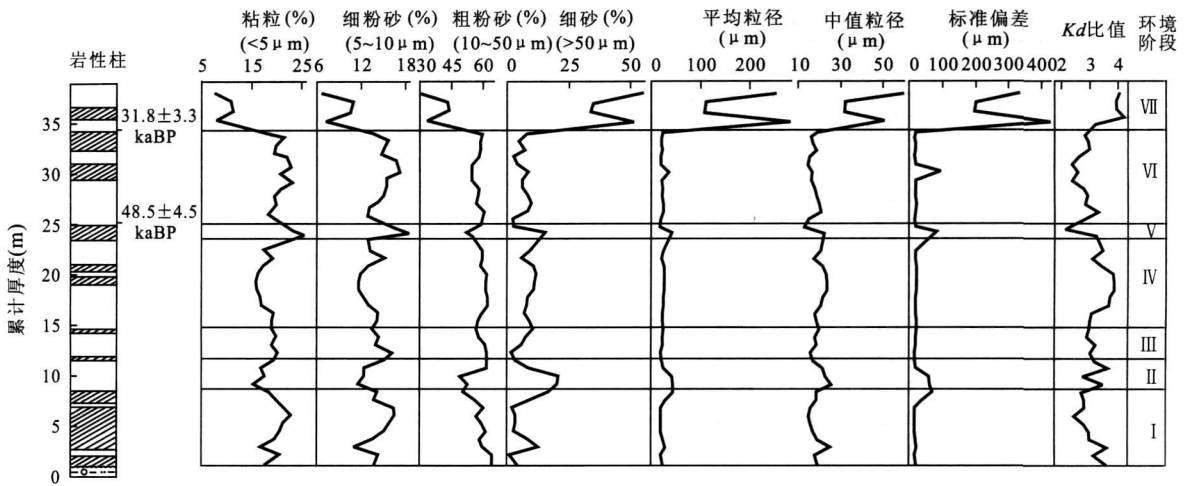


图 1 甘肃临洮塔湾剖面黄土 - 古土壤序列粒度变化曲线图

Fig. 1 Grain size variation in the loess sequence at Tawan, Lintao County, Gansu Province

I. 温暖较湿; II. 温干; III. 温干偏湿; IV. 温干; V. 温暖较湿; VI. 温干偏湿; VII. 温凉干旱

象,反映了气候总体湿润过程中的一次干冷事件。

II阶段:距底 8.5~11.5 m,沉积物粒度显著变粗,反映了气候的突变.粒径平均值为 33.11 μm ,中值粒径平均值为 21.64 μm ,Kd 值平均为 3.25,粘粒含量平均为 17.37%,砂粒含量平均为 13.5%。段沉积物粒径整体变化趋势为粘粒含量明显减小,粗粉砂、砂粒含量突然增大,表明由末次间冰期向末次冰期转变时,冬季风较为强劲,总体显示气候温干。

II阶段:距底 11.5~14.6 m,沉积物平均粒径的平均值为 22.63 μm ,中值粒径平均值为 17.99 μm ,Kd 值平均为 3.04,粘粒含量平均为 19.47%。粗粉砂含量平均为 59.1%,反映气候总体温干偏湿,其间出现了几次小幅度的干湿波动。

IV阶段:距底 14.6~23.4 m,沉积物粒径的平均值为 27.88 μm ,中值粒径平均值为 21.04 μm ,Kd 值平均为 3.46,粘粒含量平均为 17.26%。粗粉砂含

量平均为 59.77%, 为整个剖面的最大值, 此时砂粒含量也较高, 平均为 10.21%; 反映气候恶化, 但总体气候仍为温干, 其间出现了一次小幅度的气候温湿波动。

V阶段: 距底 23.4~24.9 m, 沉积物平均粒径为 18.36 μm , 为整个剖面的最低值; 中值粒径值为 13.88 μm , 为全剖面最低; 粘粒含量高达 23.9%; 粗粉砂平均含量为 55.95%, K_d 值平均为 2.36, 表明本阶段气候明显好转, 气候转为温暖较湿。

VI阶段: 距底 24.9~34.2 m, 沉积物平均粒径值为 23.46 μm , 粘粒含量为 20.53%, 粗粉砂平均含量为 57.6%, K_d 值平均为 2.82, 反映气候较 V 阶段稍有变化, 但总体温干偏湿, 其间出现了几次小幅度的干湿波动。

VII阶段: 距底 34.2~39 m, 沉积物平均粒径值为 188.87 μm , K_d 值平均为 4.01, 反映气候温凉干旱。

从以上粒度变化曲线来看, 研究区晚更新世气候经历了由温暖较湿→温干→温干偏湿→温干→温暖较湿→温干偏湿→温凉干旱 7 个阶段的演变, 反映了末次间冰期以来临夏地区气候的快速变化和的不稳定性。

3 磁化率与环境变迁

磁化率作为一种气候替代性指标, 已成为黄土-古土壤序列研究的一个重要物理参量, 在中国黄土研究中得到了较广泛的应用(安芷生等, 1977; 李吉均等, 1990; 韩家懋等, 1991; 陈发虎等, 1992; 刘秀铭等, 1993; Heller and Liu, 1994; 吕厚远等, 1994)。同时, 磁化率也可作为反映东亚夏季风强度的气候代用指标, 在第四纪间冰期时, 黄土高原地区盛行夏季风, 粉尘堆积相对减弱, 气温较高, 降水增多, 成壤作用加快, 成壤过程生成新的强磁性矿物, 使得磁性矿物含量增加, 进而导致磁化率增高。冰期时, 盛行冬季风, 搬运到黄土高原的物质较粗, 气候干冷, 不利于磁铁矿等强磁性矿物的形成, 磁化率相对较低。黄土磁化率值的变化可能指示了与相对暖湿气候相关的高原夏季风环流强度的变化。古土壤的较高磁化率值在一定程度上反映了温湿气候下湿度增大促成的植被密度大、成壤作用较强的状况; 反之, 低磁化率值则指示了湿度较小、植被稀疏、发育黄土的干冷气候状况(施雅风等, 1999)。

3.1 样品采集与分析

以 40 cm 为采样间距, 共获得样品 91 件。磁化率的测定是在 HKB 3 数字无定向磁化率仪上进行。对每一样品进行了 3 个方位测量, 计算其算术平均值作为最终测量结果, 以体积磁化率表示, 同时进行了天然剩磁(磁倾角 I 、磁偏角 D) 的测量。样品测试在中国地质大学(武汉)岩石磁学实验室完成。

测试结果表明(表 2), 磁化率最高值为 1373.0×10^{-6} SI, 最低值为 253.7×10^{-6} SI, 平均值为 464.5×10^{-6} SI, 差异较为明显。剖面中古土壤磁化率值高, 黄土磁化率值低。古土壤磁化率值是黄土磁化率值的 1.78 倍左右。

3.2 磁化率特征及古环境意义

前人研究表明, 磁化率与温度和降水量呈线性关系。运用吕厚远等(1994)提出的磁化率对温度和降水量的四次回归方程:

$$Y_1 = -2.3731 + 0.21567X - 1.1053 \times 10^{-3}X^2 + 2.7069 \times 10^{-6}X^3 - 2.65275 \times 10^{-9}X^4, \quad (1)$$

(1)式中: Y_1 为年均温度; X 为磁化率值。

$$Y_2 = -22.706 + 11.554X - 6.7166 \times 10^{-2}X^2 + 1.8684 \times 10^{-4}X^3 - 1.9264 \times 10^{-7}X^4. \quad (2)$$

(2)式中: Y_2 为年平均降水量; X 为磁化率值。

可以推算出研究区晚更新世古温度和古降水量的变化, 并将黄土-古土壤序列中的磁化率、磁倾角(I)、磁偏角(D)、古温度和古降水量变化成图(图 2)。由图 2 可见, 古地磁样品全部为正极性, 应属布容极性时沉积。磁化率、古温度及古降水量与黄土-古土壤有很好的对应关系, 磁化率高值处对应古土壤, 磁化率低值处对应风成黄土, 并且古土壤发育时温度和降水量较高, 黄土堆积时温度和降水量较低。整个剖面的磁化率值的波动变化共有 20 次左右。

根据磁化率及温度、降水量变化可将其环境变迁过程划分为 7 个阶段(图 2):

I阶段: 距底 1.0~8.5 m, 该段磁化率值为本剖面最高, 为 $253.7 \times 10^{-6} \sim 1373.0 \times 10^{-6}$ SI, 曲线波动频繁, 出现 3 峰、2 谷, 分别代表了 3 个暖期和两个冷期, 表明发生过 3 次显著的温暖时期和两次明显干冷的急剧大幅度波动。古温度和古降水量推算出其年均温度 2.4~12.5 $^{\circ}\text{C}$, 平均达 7.8 $^{\circ}\text{C}$, 比现今的温度高出 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 左右(气象记录显示临夏地区现代年均温度 6.3 $^{\circ}\text{C}$, 平均降水量 500 mm), 年均降水量 230~710 mm, 平均达 500 mm, 表明气候温暖较湿。

表 2 甘肃临洮塔湾剖面黄土-古土壤序列磁化率测试数据(单位: 10^{-6} SI)

Table 2 Tested data of magnetic susceptibility of loess paleosol sequence at Tawan, Lintao County, Gansu Province

样品号	磁化率	样品号	磁化率	样品号	磁化率	样品号	磁化率
GD22 2	338.5	GD16 8	309.3	GD10 11	289.2	GD6 3	548.8
GD22 1	380.3	GD16 7	264.2	GD10 10	310.0	GD6 2	344.7
GD21 3	415.7	GD16 6	258.5	GD10 9	312.5	GD6 1	453.2
GD21 2	394.7	GD16 5	311.8	GD10 8	263.8	GD5 3	342.2
GD21 1	490.0	GD16 4	321.8	GD10 7	286.5	GD5 2	759.0
GD20 3	304.8	GD16 3	240.9	GD10 6	307.0	GD5 1	441.0
GD20 2	372.5	GD16 2	270.5	GD10 5	294.5	GD4 1	441.7
GD20 1	352.5	GD16 1	312.0	GD10 4	304.7	GD3 11	933.7
GD19 5	419.3	GD15 4	637.7	GD10 3	363.5	GD3 10	1089.3
GD19 4	419.3	GD15 3	755.0	GD10 2	482.2	GD3 9	769.0
GD19 3	405.2	GD15 2	617.2	GD10 1	376.3	GD3 8	676.7
GD19 2	453.0	GD15 1	716.0	GD9 1	470.0	GD3 7	421.5
GD19 1	368.0	GD14 6	347.5	GD8 6	328.3	GD3 6	771.7
GD18 3	323.3	GD14 5	414.7	GD8 5	420.7	GD3 5	873.3
GD18 2	368.8	GD14 4	367.3	GD8 4	403.7	GD3 4	1172.0
GD18 1	354.5	GD14 3	324.2	GD8 3	518.0	GD3 3	815.7
GD17 4	408.7	GD14 2	342.0	GD8 2	464.0	GD3 2	706.2
GD17 3	522.0	GD14 1	323.8	GD8 1	431.8	GD3 1	617.5
GD17 2	452.0	GD13 2	805.7	GD7 1	613.0	GD2 1	253.7
GD17 1	371.8	GD13 1	546.2	GD6 7	448.0	GD4 3	885.7
GD16 11	410.2	GD12 1	350.0	GD6 6	470.5	GD4 2	1373.0
GD16 10	308.3	GD11 2	306.5	GD6 5	333.8	GD4 1	277.0
GD16 9	285.3	GD11 1	299.3	GD6 4	451.5		

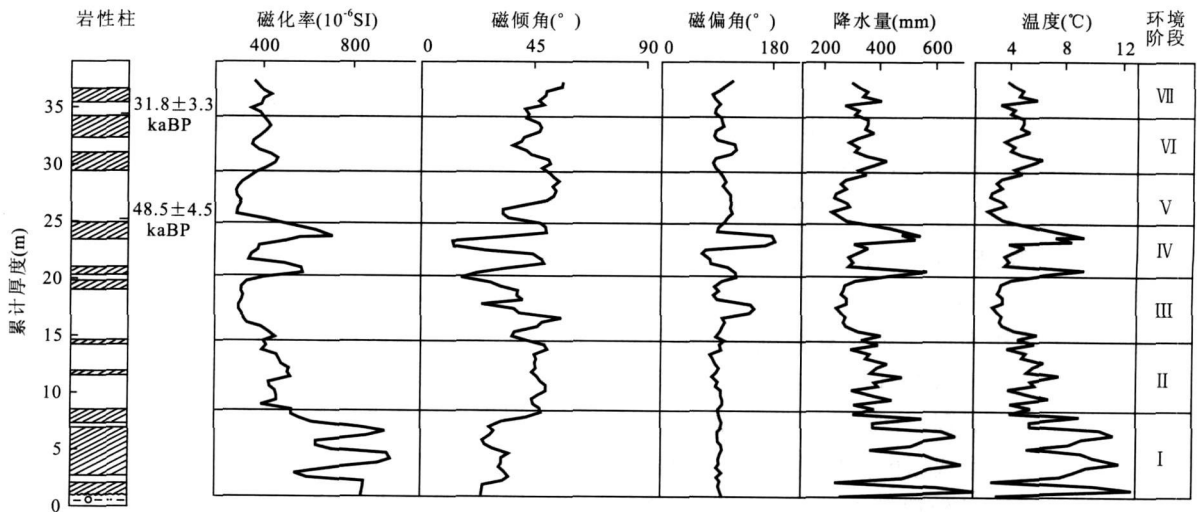


图 2 甘肃临洮塔湾剖面黄土-古土壤序列磁化率、古降水量与古温度变化曲线图

Fig. 2 Curves of magnetic susceptibility, paleo precipitation and paleo temperature in the loess paleosol sequence at Tawan, Lintao County, Gansu Province

I. 温暖较湿; II. 温干; III. 温干偏凉; IV. 温干偏湿; V. 温干偏凉; VI. 温干偏湿; VII. 温干

II阶段: 距底 8.5 ~ 14.8 m. 该段磁化率曲线较 I 阶段明显突变, 其间有 2 次小幅冷暖波动. 磁化率值最大值为 $328.3 \times 10^{-6} \sim 613.0 \times 10^{-6}$ SI, 平均 442.3×10^{-6} SI. 此时期, 年均温度 $3.7 \sim 7.3$ °C, 平

均 5.2 °C, 较 I 阶段降温达 2.6 °C, 年均降水量 $300 \sim 470$ mm, 平均 370 mm. 表明由末次间冰期向末次冰期转变时, 冬季风较为强劲, 成土作用较弱, 磁化率值低. 气候变为温干.

II阶段: 距底 14.8~20.3 m. 磁化率曲线显示该段黄土磁化率值继续降低, 达全剖面次低值. 为 $263.8 \times 10^{-6} \sim 482.2 \times 10^{-6}$ SI, 平均 320.7×10^{-6} SI. 这一时期, 温度与降水量也比II阶段明显降低, 年均温度 $2.6 \sim 5.7$ °C, 平均 3.5 °C, 年均降水量 240~400 mm, 平均 280 mm. 总体显示气候温干偏凉.

IV阶段: 距底 20.3~24.9 m. 磁化率曲线图上显示两峰夹一谷, 表明该段气候波动, 其间发生了一次明显的冷暖交替. 磁化率值较III阶段显著增大, 为 $323.8 \times 10^{-6} \sim 805.7 \times 10^{-6}$ SI, 平均 516.4×10^{-6} SI. 年均温度 $3.5 \sim 9.1$ °C, 平均 6.0 °C, 年均降水量 290~560 mm, 平均 410 mm. 气候总体温干偏湿.

V阶段: 距底 24.9~29.4 m. 磁化率曲线图上显示气候发生突变, 磁化率值在该时段达全剖面最低, 为 $240.9 \times 10^{-6} \sim 410.2 \times 10^{-6}$ SI, 平均 299.4×10^{-6} SI. 温度和降水量较IV阶段明显降低, 年均温度 $2.2 \sim 4.8$ °C, 平均 3.1 °C, 年均降水量 220~350 mm, 平均 270 mm. 反映气候温干偏凉.

VI阶段: 距底 29.4~34.2 m. 磁化率值有所增大, 为 $323.3 \times 10^{-6} \sim 522.0 \times 10^{-6}$ SI, 平均 405.5×10^{-6} SI. 气温较V阶段明显回升, 年均温度 $3.5 \sim 6.2$ °C, 平均 4.7 °C, 年均降水量 280~420 mm, 平均 350 mm. 反映气候为温干偏湿.

VII阶段: 距底 34.2~39 m. 该段磁化率为 $304.8 \times 10^{-6} \sim 490.0 \times 10^{-6}$ SI, 平均 381.1×10^{-6} SI. 年均温度 $3.2 \sim 5.8$ °C, 平均 4.4 °C, 年均降水量 270~400 mm, 平均 330 mm. 较前一阶段有所下降, 表现为先升后降的趋势, 总体气候为温干.

4 结论

根据临夏地区临洮黄土剖面中的粒度环境指标和磁化率环境指标的分析, 二者均具有 7 个环境变迁阶段, 虽然总体变迁特征一致, 但各变迁阶段的位置不完全一致, 根据其岩性特征、粒度组成和磁化率等环境指标的比较和综合研究, 也可将研究区晚更新世气候及环境变化分为 7 个阶段 (图 3):

I 阶段: 距底 1~8.5 m (92.4~78.8 ka). 相当于离石黄土上部 S₁ 古土壤. 该阶段由三层古土壤夹两层黄土组成, 其中第二层古土壤厚约 415 cm, 黄土层相对较薄, 厚 40~60 cm. 粒度记录显示该段粒度变粗, 平均粘粒含量 20.03%, 平均粗粉砂粒含量 59.13%, 平均粒径 24.42 μm, 平均 K_d 值 2.97. 磁

化率变化较大 ($253.7 \times 10^{-6} \sim 1373.0 \times 10^{-6}$ SI), 平均磁化率 716.8×10^{-6} SI. 粒度与磁化率特征表明, 本阶段气候波动频繁, 磁化率变化幅度较大, 出现明显的 3 峰、2 谷, 反映其对气候的变化十分灵敏. 这在临夏北塬剖面黄土-古土壤的 CaCO₃ 记录中也有表现 (管东红等, 1996). 古温度和古降水量估算显示 S₁ 期间年均温度达 7.8 °C, 年均降水量达 500 mm 左右. 而最高年均温度可达 12.5 °C, 年均降水量可达 710 mm. 最低只有 2.4 °C, 降水量 230 mm 左右. 而临夏塬堡剖面 S₁ 形成时的最高年均温度也达 10 °C, 年均降水量可达 600 mm (何勇等, 2002). 表明研究区末次间冰期期间, 虽然有两次干冷事件, 但气候总体温暖较湿, 夏季风盛行, 成土作用强.

II阶段: 距底 8.5~14.8 m (78.8~65.3 ka). 该阶段由三层黄土夹两层薄古土壤组成, 粒度记录显示该段黄土粒度变粗, 平均粘粒含量 18.63%, 平均粗粉砂粒含量高达 57.97%, 平均粒径 26.83 μm, 平均 K_d 值 3.12. 磁化率曲线较 I 阶段明显突变, 其间有两次小幅冷暖波动. 平均磁化率为 442.3×10^{-6} SI. 年均温度 5.2 °C 左右, 较 I 阶段降温达 2.6 °C, 年均降水量 370 mm 左右. 表明由末次间冰期向末次冰期转变时, 冬季风较为强劲, 成土作用较弱. 气候变为温干.

III阶段: 距底 14.8~20.3 m (65.3~57.3 ka). 该阶段由二层黄土夹一层古土壤组成, 粒度记录显示平均粘粒含量 16.55%, 平均粗粉砂含量达 59.77%, 平均砂粒含量达 10.21%, 平均粒径 25.94 μm, 平均 K_d 值 3.71. 磁化率曲线显示磁化率值继续降低, 平均磁化率为 320.7×10^{-6} SI. 温度与降水量也比II阶段明显降低, 年均温度 3.5 °C 左右, 年均降水量 280 mm 左右, 是气候最为干冷的时段, 总体显示气候温干偏凉.

IV阶段: 距底 20.3~24.9 m (57.3~47.7 ka). 该阶段由二层古土壤夹一层黄土组成, 粒度记录显示其粘粒含量高达 23.9%, 平均粗粉砂含量 57.38%, 平均粒径 25.23 μm, 平均 K_d 值 2.89. 磁化率曲线图上显示两峰夹一谷, 表明该段气候波动幅其间发生了一次明显的冷暖交替. 磁化率值较III阶段显著增大 ($323.8 \times 10^{-6} \sim 805.7 \times 10^{-6}$ SI), 平均磁化率为 516.4×10^{-6} SI. 年均温度在 6.0 °C 左右, 年均降水量 410 mm 左右. 气候总体温干偏湿.

V阶段: 距底 24.9~29.4 m (47.7~40.9 ka). 该阶段仅由一层黄土组成, 粒度记录显示其平均粘

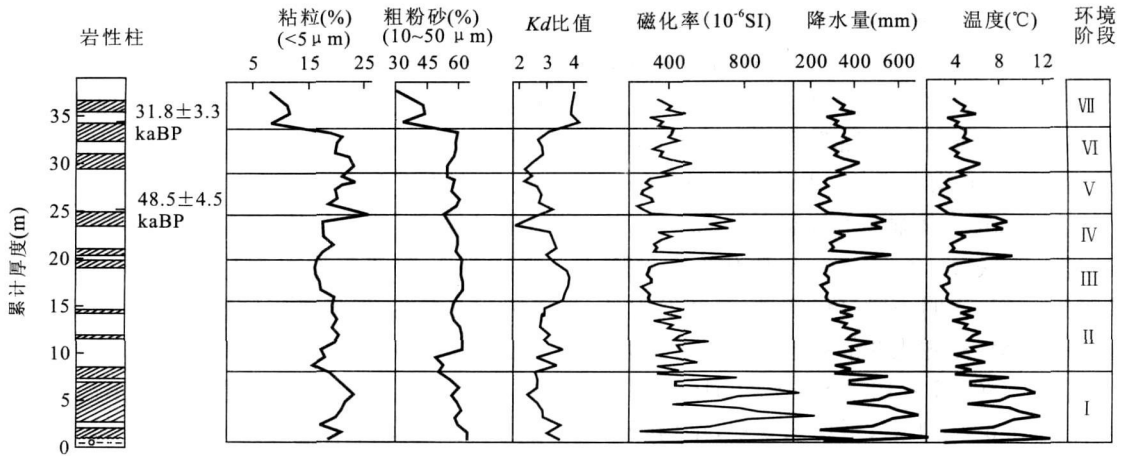


图 3 甘肃临洮塔湾剖面黄土-古土壤序列多指标综合对比图

Fig. 3 Comprehensive comparison of multi indexes in the loess paleosol sequence at Tawan, Lintao County, Gansu Province

I. 温暖较湿; II. 温干; III. 温干偏凉; IV. 温干偏湿; V. 温干偏凉; VI. 温干偏湿; VII. 温干

粒含量 20.47%，平均粗粉砂含量 57.12%，平均粒径 25.46 μm ，平均 Kd 值 2.81。磁化率曲线图上显示气候发生突变，磁化率最低 ($240.9 \times 10^{-6} \sim 410.2 \times 10^{-6}$ SI)，平均磁化率为 299.4×10^{-6} SI。温度和降水量较 IV 阶段明显降低，年均温度 3.1 $^{\circ}\text{C}$ 左右，年均降水量约 270 mm。反映气候温干偏凉。

V 阶段：距底 29.4 ~ 34.2 m (40.9 ~ 32.4 ka)。该阶段由二层古土壤夹一层黄土组成，粒度记录显示平均粘粒含量 20.70%，平均粗粉砂含量 58.08%，平均粒径 21.46 μm 平均 Kd 值 2.82。磁化率值有所增大 ($323.3 \times 10^{-6} \sim 522.0 \times 10^{-6}$ SI)，平均磁化率为 405.5×10^{-6} SI。气温较 V 阶段明显回升，年均温度 4.7 $^{\circ}\text{C}$ 左右，年均降水量 350 mm 左右。反映气候为温干偏湿。

VII 阶段：距底 34.2 ~ 39 m (32.4 ka 以后)。该阶段由二层黄土夹一层弱古土壤化黄土组成，粒度记录显示粒径异常增大，平均粘粒含量仅 9.46%，平均细砂含量达 43.95%，平均粒径 188.89 μm ，平均 Kd 值 4.01。磁化率值变化较大 ($304.8 \times 10^{-6} \sim 490.0 \times 10^{-6}$ SI)，平均磁化率为 381.1×10^{-6} SI。年均温度 4.4 $^{\circ}\text{C}$ 左右，年均降水量 330 mm 左右。较前一阶段有所下降，表现为先升后降的趋势。总体气候为温干。

通过区域资料及与深海氧同位阶段对比分析 (郭正堂等, 1994; 李玉梅等, 2003; 陈一萌等, 2004b)，本剖面中 I 阶段相当于 MIS5 温暖期；II 阶段和 III 阶段相当于 MIS4 降温期；IV 阶段、V 阶段和 VI 阶段相当于 MIS3 的气候温暖期；VII 阶段相当于

MIS2 降温期。

塔湾黄土-古土壤序列记录的晚更新世环境变化与临夏塬堡剖面 (何勇等, 2002; 陈一萌等, 2004b)、渭南 (郭正堂等, 1994) 及兰州九洲台剖面 (吕厚远等, 1999)、若尔盖 RM 孔 (沈才明等, 1996)、南海西南部 (郑范等, 2005)、东海内陆架闽浙沿岸 (肖尚斌等, 2005)、银川盆地 (董国榜等, 1995) 等有极好的可对比性，说明晚更新世环境变化具有广泛的区域性。但与邻区兰州九洲台和若尔盖 RM 孔相比，同时期临夏地区气候明显偏温偏湿，这与研究区特殊的地理位置关系密切。临夏地区位于青藏高原与黄土高原过渡地带，处于东部季风区、西北干旱区及青藏高原高寒区三大自然带的交汇地带，地貌梯度变化大，夏季风容易受阻于地貌梯度带，并产生降水，形成局部湿润区。

致谢：感谢 1 : 25 万临夏、定西幅区调项目的张克信教授、朱云海教授无私的帮助和支持。还有林启祥副教授、樊光明教授等对本文野外和室内资料的收集给予了极大的方便。本文的古地磁测试由中国地质大学 (武汉) 朱宗敏老师完成，光释光年龄由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试，一并表示感谢！

References

- AN, Z. S., Wang, J. D., Li, H. M., 1997. Paleomagnetic research of the Luochuan loess section. *Geochimica*, 4, 239 - 249 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F. H., Qie, X. S., Zhang, Y. T., et al., 1993. Climatic

- record of Lanzhou loess and climatic cycles on the scale of ten thousand years. *Chinese Science Bulletin*, 14: 39 – 43.
- Chen, Y. M., Rao, Z. G., Zhang, J. W., et al., 2004a. Comparative study of MIS3 climatic features recorded in Malan loess in the western part of the loess plateau and global records. *Quaternary Sciences*, 24: 359 – 365 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. M., Rao, Z. G., Zhang, J. W., et al., 2004b. Stratum division and age dating of the mid to late malan loess in Yuanbao section, Linxia of Gansu Province. *Journal of Desert Research*, 24: 539 – 543 (in Chinese with English abstract).
- Ding, Z. L., Sun, J. M., Yu, Z. W., et al., 1998. Chronology of environmental events over East Asia during the past 130 ka. *Chinese Science Bulletin*, 43(21): 1761 – 1769.
- Global Change (IGBP) Report No. 19, 1992. Past global changer projects: Proposed implementation plans for research activities. Stockholm, 1 – 110.
- Guan, D. H., Xi, X. X., Hao, Y. P., et al., 1996. Climate instability revealed in the Beiyuan CaCO₃ record during the last interglacial age. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 18: 119 – 124 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. T., Liu, D. S., An, Z. S., 1994. Paleosols of the last 0.15 Ma in the Weinan loess section and their paleoclimatic significance. *Quaternary Sciences*, 3: 256 – 269 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. M., Hus, J. J., Liu, D. S., et al., 1991. Magnetic properties of the Malan and Lishi formations. *Quaternary Sciences*, 4: 310 – 324 (in Chinese with English abstract).
- He, Y., Qin, D. H., Ren, J. W., et al., 2002. The climatic record of organic matter in the paleosol from the Yuanbao Holocene profile. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24: 512 – 516 (in Chinese with English abstract).
- Heller, F., Liu, T. S., 1994. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys. J. R., Astron. Soc.*, 77: 125 – 141.
- Li, J. J., Feng, Z. D., Tang, L. Y., 1988. Late Quaternary monsoon patterns on the loess plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 125 – 135.
- Li, J. J., Zhu, J. J., Kang, J. C., et al., 1992. The comparison of Lanzhou loess profile with Vostok ice core in Antarctica over the last Glaciation cycle. *Science in China (Ser. B)*, 4: 94 – 106.
- Li, Y. M., Liu, D. S., Wu, W. X., et al., 2003. Paleoenvironment in Chinese loess plateau during MIS3: Evidence from Malan loess. *Quaternary Sciences*, 23: 69 – 76 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. S., 1985. Loess and environment. Science Press, Beijing, 191 – 208 (in Chinese).
- Liu, X. M., Liu, D. S., John, S., 1993. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance. *Quaternary Sciences*, 3: 281 – 287 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Y., An, Z. S., 1998. Paleoclimatic significance of grain size of loess palaeosol deposit in Chinese loess plateau. *Science in China (Ser. D)*, 41(6): 626 – 631.
- Lü, H. Y., Han, J. M., Wu, N. Q., et al., 1994. Magnetic susceptibility of Chinese modern soil and its paleoclimatic significance. *Science in China (Ser. B)*, 24(12): 1290 – 1297 (in Chinese).
- Lü, H. Y., Liu, D. S., Wu, N. Q., et al., 1999. Phytolith record of vegetation succession in the southern loess plateau since Late Pleistocene. *Quaternary Sciences*, 4: 336 – 349 (in Chinese with English abstract).
- Lü, L. Q., Fang, X. M., Lu, H. Y., et al., 2004. Millennial scale climate change since the last glaciation recorded by grain sizes of loess deposits on the northeastern Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 49(11): 1157 – 1164.
- Shen, C. M., Tang, L. Y., Wang, S. M., 1996. Vegetation and climate during the last 250 000 years in Zoige region. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 13: 373 – 385 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. F., Li, J. J., Li, B. Y., et al., 1999. Uplift of the Qinghai Xizang (Tibetan) plateau and East Asia environmental change during late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*, 54: 10 – 20 (in Chinese with English abstract).
- Song, C. H., Bai, J. F., Zhao, Y. D., et al., 2005. The color of lacustrine sediments recorded climatic changes from 13 to 4.5 Myr in Linxia basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 507 – 513 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. H., Lu, H. Y., David, R., et al., 2000. Bimode grain size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication. *Acta Sedimentologica*, 18(3): 327 – 335 (in Chinese with English abstract).
- Tong, G. B., Shi, Y., Fan, S. X., et al., 1995. Environment features of Yinchuan basin in late Quaternary period. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20: 421 – 426 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. L., Fang, X. M., Li, J. J., 1999. Eolian sand deposition in Chinese loess plateau during MIS3: Evidence

- tion and its environmental significance in the northeastern margin of the Qinghai Xizang Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 44(24): 2250 – 2255.
- Xiao, S. B., Li, A. C., Chen, M. H., et al., 2005. Recent 8 ka mud records of the east Asian winter monsoon from the inner shelf of the east China sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30: 573 – 580 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Y., Li, C. A., He, K., et al., 2002. Climatic implication and grains size composition from Minhe loess in Qinghai Province. *Geological Science and Technology Information*, 21: 41 – 44 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, F., Li, Q. Y., Chen, M. H., et al., 2005. Late Pleistocene paleogeographic characteristics of the South West South China sea since 500 ka. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30: 534 – 542 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 安芷生, 王俊达, 李华梅, 1977. 洛川黄土剖面的古地磁研究. *地球化学*, 4: 239 – 249.
- 陈发虎, 鄒秀书, 张宇田, 等, 1992. 兰州黄土记录与万年尺度气候变化周期. *科学通报*, 24: 57 – 59.
- 陈一萌, 饶志国, 张家武, 等, 2004a. 中国黄土高原西部马兰黄土记录 MIS3 气候特征与全球气候记录的对比研究. *第四纪研究*, 24: 359 – 365.
- 陈一萌, 饶志国, 张家武, 等, 2004b. 临夏塬堡黄土剖面中晚马兰黄土地层划分和形成时代. *中国沙漠*, 24: 539 – 543.
- 丁仲礼, 孙继敏, 余志伟, 等, 1998. 黄土高原过去 130ka 来古气候事件年表. *科学通报*, 43(6): 567 – 574.
- 管东红, 奚晓霞, 郝永萍, 等, 1996. 北塬剖面碳酸钙记录的末次间冰期气候不稳定性. *冰川冻土*, 18: 119 – 124.
- 郭正堂, 刘东生, 安芷生, 1994. 渭南黄土沉积中十五万年来的古土壤及其形成时的古环境. *第四纪研究*, 3: 256 – 269.
- 韩家懋, Hus J. J., 刘东生, 等, 1991. 马兰黄土和离石黄土的磁学性质. *第四纪研究*, 4: 310 – 324.
- 何勇, 秦大河, 任贾文, 等, 2002. 临夏塬堡全新世黄土剖面古土壤有机质碳同位素的气候记录. *冰川冻土*, 24: 512 – 516.
- 李吉均, 朱俊杰, 康建成, 等, 1990. 末次冰期旋迴兰州黄土剖面与南极东方站冰岩芯的对比. *中国科学(B 辑)*, 10: 1086 – 1094.
- 李玉梅, 刘东生, 吴文祥, 等, 2003. 黄土高原马兰黄土记录 MIS3 温湿气候. *第四纪研究*, 23: 69 – 76.
- 刘东生, 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 191 – 208.
- 刘秀铭, 刘东生, John S., 1993. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义. *第四纪研究*, 3: 281 – 287.
- 鹿化煜, 安芷生, 1998. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义. *中国科学(D 辑)*, 28(3): 278 – 283.
- 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等, 1994. 中国现代土壤磁化率分析及其气候意义. *中国科学(B 辑)*, 24(12): 1290 – 1297.
- 吕厚远, 刘东生, 吴乃琴, 等, 1999. 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. *第四纪研究*, 4: 336 – 349.
- 吕连清, 方小敏, 鹿化煜, 等, 2004. 青藏高原东北缘黄土粒度记录的末次冰期千年尺度气候变化. *科学通报*, 49(11): 1091 – 1098.
- 沈才明, 唐领余, 王苏民, 1996. 若尔盖地区 25 万年以来的植被与气候. *微体古生物学报*, 13: 373 – 385.
- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等, 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. *地理学报*, 54: 10 – 20.
- 宋春晖, 白晋锋, 赵彦德, 等, 2005. 临夏盆地 13 ~ 4.4 Ma 湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨. *沉积学报*, 23(3): 507 – 513.
- 孙东怀, 鹿化煜, David, R., 等, 2000. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义. *沉积学报*, 18(3): 327 – 335.
- 童国榜, 石英, 范淑贤, 等, 1995. 银川盆地晚第四纪环境特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 20: 421 – 426.
- 王建力, 方小敏, 李吉均, 1999. 青藏高原东北部 15 Ma 以来的风沙沉积. *科学通报*, 44(12): 1326 – 1331.
- 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等, 2005. 近 8ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录. *地球科学——中国地质大学学报*, 30: 573 – 580.
- 谢远云, 李长安, 何葵, 等, 2002. 青海省民和黄土的粒度组成及气候含义. *地质科技情报*, 21: 41 – 44.
- 郑范, 李前裕, 陈木宏, 等, 2005. 南海西南部晚更新世 500 ka 以来的古海洋学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 30: 534 – 542.