

# 黄土高原第四纪粉尘沉积速率的时空变化及其意义<sup>①</sup>

吴海斌 陈发虎 王建民

(兰州大学地理科学系 兰州 730000)

**提 要** 本文系统地计算了黄土高原洛川、西峰、宝鸡、西安刘家坡、兰州九洲台、西宁大墩岭黄土剖面的粉尘沉积速率,发现粉尘沉积速率除随冰期、间冰期具有明显波动外,还呈现时间上由老向新的阶段性升高,空间上由西北向东南降低的总体趋势。第四纪以来,黄土高原粉尘沉积速率出现了几次异常增高的时期,它们与青藏高原隆起时段相吻合。距今约70万年,该区冬季风出现重大调整,冬季风风力明显的逐步增强,风向偏转到NW方向。粉尘沉积速率可作为我国冬季风强弱变化的较好指标。

**关键词** 粉尘沉积速率 时间序列 冬季风

**第一作者简介** 吴海斌 男 24岁 硕士研究生 自然地理

## 1 引言

第四纪以来,蒙古高压的增强和东亚季风环流的建立,使得我国北方(尤其在冬半年)不同程度地接受了大量的大气粉尘沉积,从而形成世界上分布最广、厚度最大的黄土层,较为完整的记录了最近240万年以来的环境变化信息<sup>[4]</sup>。

中国北方粉尘沉积速率前人曾做过研究<sup>[1,6,9]</sup>,但以往的研究仅局限于某一或某两个剖面,未涉及粉尘沉积速率在黄土高原不同区域的变化。由于粉尘沉积速率直接指示季风区冬季风强度变化的历史和特征,它比前人使用过的其它指标更为直观。因此,交叉分析黄土高原不同地点的粉尘沉积速率,可获得具有普遍意义的冬季风强弱变化历史;同时由于粉尘沉积速率与低空大气冬季风的气流密切相关,黄土高原区不同地点粉尘沉积速率的时空差异指示着冬季风环流的变化。

近十年来,我国黄土研究有长足进展,基本建立了较为可信的黄土地层时间框架和黄土-古土壤序列。例如,黄土高原中部的洛川剖面<sup>[6]</sup>、西峰剖面<sup>[3]</sup>、刘家坡剖面<sup>[13]</sup>、段家坡剖面<sup>[12]</sup>、宝鸡剖面<sup>[15]</sup>,以及黄土高原西部的兰州九洲台剖面<sup>[2]</sup>和西宁大墩岭剖面<sup>[8]</sup>。所有这些为深入研究我国北方粉尘沉积速率

的时空变化奠定了良好的基础。

基于以上各点,我们选择宝鸡、刘家坡、洛川、西峰、九洲台和大墩岭剖面(图1),对黄土高原区粉尘沉积速率时空变化进行研究。

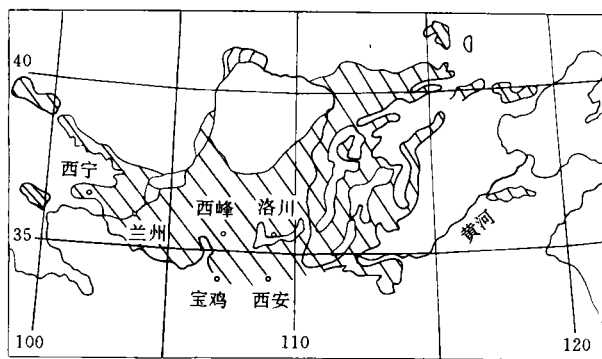


图1 中国北方黄土分布及典型黄土剖面位置  
Fig. 1 Loess distribution in northern China and locations of typical loess sections

## 2 时间序列建立

前人对以上剖面均作了较为详细的古地层测年,获得了若干古地磁界限年龄。这些剖面的黄土-古土壤序列均以刘东生等<sup>[6]</sup>建立的洛川剖面为标

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(49571065)和国家教委跨世纪优秀人才基金资助项目  
收稿日期:1997-04-18 收修改稿日期:1997-11-19

准,因此,各剖面黄土-古土壤序列有极好的对比性,也就有了一个统一的相对时间序列,这正是本文能够统一各剖面时间序列和做粉尘沉积速率计算的基础。

在各剖面磁性地层学、<sup>14</sup>C 测年、热释光测年和裂变径迹测年基础上,前人曾建立过各种模型来计算任一测点处的年龄值。例如,洛川剖面的堆积通量模型<sup>[6]</sup>,西峰剖面的磁化率模型<sup>[4]</sup>,宝鸡剖面的轨道调谐模型<sup>[15]</sup>和洛川剖面 S<sub>1</sub> 以来粒度年龄模型<sup>[1]</sup>。然而,这些模型均存在一定的不足,计算的年龄难免与实际年龄有所差异,有的甚至差异很大。综观各模

型,我们认为轨道调谐模型相对更为可信,也更易于实际应用。文中所有剖面各古土壤层的开始和结束年龄均以丁仲礼建立的宝鸡剖面为标准<sup>[15]</sup>,同时各层间各点年龄按照 Kukla 的磁化率模型计算。渭南剖面运用 Kukla 模型的计算年龄与实际测量年龄<sup>[7]</sup>具有很好一致性这一基本事实,说明 Kukla 模型在较多年龄控制点下,不失为一个有效的时间标尺。因此本文综合轨道调谐模型(对每层黄土、古土壤的起始、结束年龄较可信)和磁化率年龄模型(对每个测点年龄计算较方便)的优点,对剖面各点年龄序列进行重新标定。

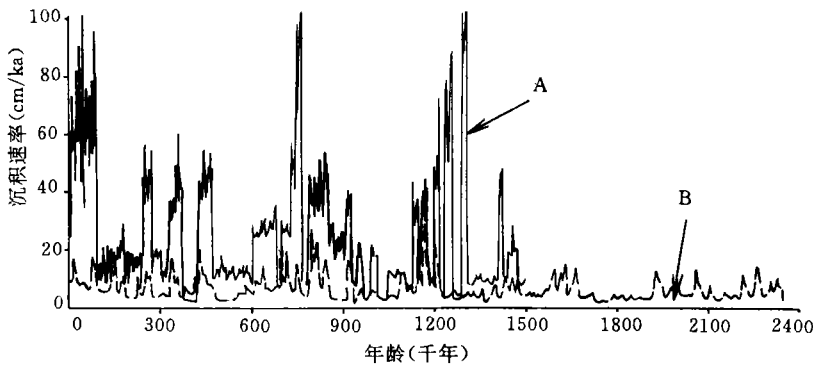


图2 粉尘沉积速率随时间变化曲线

A. 九洲台剖面; B. 洛川剖面

Fig. 2 Variations of loess accumulation rate with time

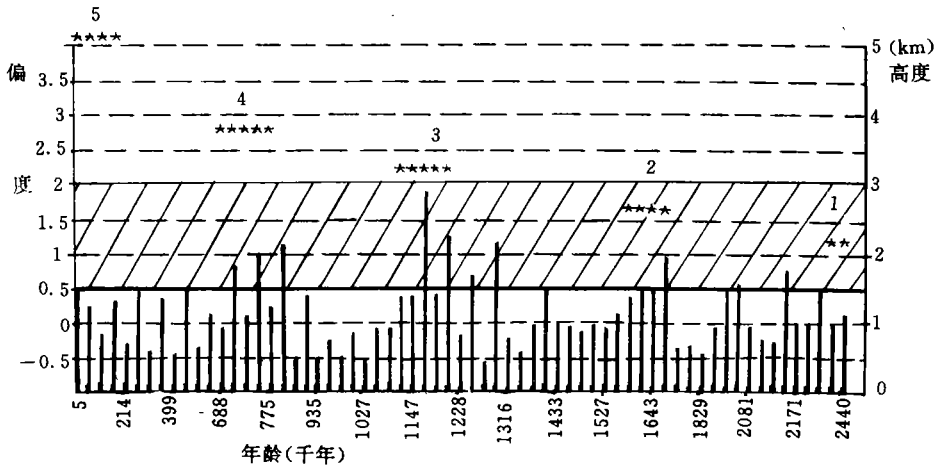


图3 粉尘沉积速率偏度及青藏高原隆起的联系

1. 青藏运动 B 幕; 2. 青藏运动 C 幕; 3~4. 昆仑-黄河运动; 5. 共和运动

Fig. 3 Correlation of the deviation of the loess accumulation rate with the uplift events of the Qinghai-Tibetan plateau

### 3 粉尘沉积速率

本文定义粉尘沉积速率为：

$$V = D/T$$

$D$ ：黄土剖面磁化率测量间距(厚度)； $T$ ：该厚度粉尘沉积所经历的时间。厚度  $D$  因处于不同深度和在不同重力压实作用下，与粉尘刚沉降下来的原始厚度  $D_0$  有较大差别，因此必须予以还原，得到其原始厚度  $D_0$ 。恢复原始厚度  $D_0$  时须知道黄土和古土壤容重，但目前只有洛川剖面有系统的容重资料，因此，本文根据洛川剖面的数据进行回归；同时，为了消除成壤作用对容重的影响，本文仅使用黄土层的容重来计算，获得剖面容重随深度变化的线性回归方程：

$$Y = 0.002356X + 1.470501 (r = 0.989138)$$

其中， $X$  为任一点的深度， $Y$  为与  $X$  对应点的容重。据此方程对其它各剖面进行容重校正；同时在校正中将洛川  $L_1$  容重  $1.48 \text{ g/cm}^3$  作为标准容重，计算得到各剖面的粉尘沉积速率(图 2)。

### 4 大气粉尘沉积速率的时空变化

#### 4.1 粉尘沉积速率异常点分析

利用粉尘沉积速率求得各剖面各层位的粉尘沉积速率的偏度值，综合 6 个剖面偏度指标(求平均值)，得到黄土高原区总的粉尘沉积速率偏度随时间变化的直方图(图 3)。

从图中可知，粉尘沉积速率偏度基本上在  $-0.5 V_{\text{平}} \sim 0.5 V_{\text{平}}$  之间变化；其中在间冰期的偏度大致在  $-0.5 V_{\text{平}} \sim 0 V_{\text{平}}$  之间；在冰期的偏度值大致在  $0 V_{\text{平}} \sim 0.5 V_{\text{平}}$  变化，表明各层粉尘沉积速率大致具有在其平均沉积速率的平衡位置摆动的规律。同时，图中有少数点却明显地偏离平衡位置，个别的粉尘沉积速率偏度达到了  $2.0 V_{\text{平}}$ 。以偏度在  $0.5 V_{\text{平}}$  年以上为其沉积速率变化的异常点，得到粉尘沉积速率的主要异常点的时间分布为：2.4~2.1 MaBP, 1.6 MaBP, 1.3~1.1 MaBP, 0.8~0.6 MaBP 左右，这与青藏高原强烈隆起时间大约为 2.5, 1.6, 1.2, 0.8, 0.6, 0.1 MaBP<sup>[6]</sup> 有很好的对应关系。

#### 4.2 粉尘沉积速率的时空变化

根据以上粉尘沉积速率主要异常点的起始时间及增加 0.1 MaBP 以来时段，得到五时段各剖面沉积速率(表 1)。

从表中可看出，第四纪以来粉尘沉积速率有阶

段性增加的趋势，即粉尘沉积速率在一段内(异常点附近)迅速的增大，之后则又趋于减小(见图 2、3)；并且在同一时间内粉尘沉积速率大致呈现从东南往西北不断增大的规律；同时，粉尘沉积速率在冰期明显大于间冰期。此外，西安刘家坡和西宁大墩岭 0.1 MaBP 以来平均粉尘沉积速率偏低，以及刘家坡、洛川、宝鸡 0.1 MaBP 以来黄土层和古土壤层粉尘沉积速率的倒置，可能与人类活动或侵蚀作用有关，而兰州九洲台 0.1 MaBP 以来异常高的粉尘沉积速率，可能与该剖面古土壤序列划分有关，值得注意。

表 1 各时段不同剖面粉尘沉积速率

Table 1 Loess accumulation rate of five stages

| 时 段               | 刘家坡<br>(cm/ka) | 洛 川<br>(cm/ka) | 宝 鸡<br>(cm/ka) | 西 峰<br>(cm/ka) | 九洲台<br>(cm/ka) | 大墩岭<br>(cm/ka) |      |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 0.1~0.0<br>(MaBP) | 黄 土            | 3.5            | 12.8           | 9.9            | 16.5           | 83.1           | 25.6 |
|                   | 古土壤            | 12.9           | 14.1           | 10.9           | 12.0           | 42.0           | 10.0 |
|                   | 平 均            | 4.8            | 13.0           | 10.1           | 16.0           | 78.0           | 23.6 |
| 0.8~0.1<br>(MaBP) | 黄 土            | 8.1            | 10.1           | 10.6           | 13.6           | 37.4           | 41.2 |
|                   | 古土壤            | 4.7            | 4.8            | 5.7            | 7.2            | 13.4           | 12.2 |
|                   | 平 均            | 6.1            | 7.3            | 8.2            | 10.4           | 26.4           | 27.5 |
| 1.3~0.8<br>(MaBP) | 黄 土            | 9.4            | 9.5            | 8.7            | 10.9           | 36.8           | 36.4 |
|                   | 古土壤            | 4.5            | 4.4            | 6.4            | 5.8            | 10.9           | 6.3  |
|                   | 平 均            | 6.9            | 7.1            | 7.9            | 8.5            | 21.0           | 19.8 |
| 1.6~1.3<br>(MaBP) | 黄 土            | 4.6            | 6.3            | 8.4            | 8.0            |                |      |
|                   | 古土壤            | 4.0            | 3.8            | 5.7            | 5.4            |                |      |
|                   | 平 均            | 4.5            | 5.5            | 7.6            | 8.5            |                |      |
| 1.6~2.5<br>(MaBP) | 黄 土            | 2.6            | 6.9            | 5.2            | 9.4            |                |      |
|                   | 古土壤            | 3.8            | 3.7            | 5.1            | 4.5            |                |      |
|                   | 平 均            | 3.0            | 4.9            | 5.1            | 5.6            |                |      |

由以上可知，粉尘沉积速率指标无疑是青藏高原隆起引起环境变化的一个极好的记录器。同时说明，正是第四纪以来青藏高原阶段性、大幅度隆起引起东亚季风环流的改变，从而导致中国北方粉尘沉积速率随之阶段性的不断增加。

### 5 利用粉尘沉积速率恢复冬季风

原理：平面上物体的重心分布以及物体的重力矩原理。

$$\text{重心: } G = \sum_{i=1}^n G_i \quad \text{重力矩: } M = G * L$$

$G_i$ :平面上各物体的重力; $L$ :重力臂

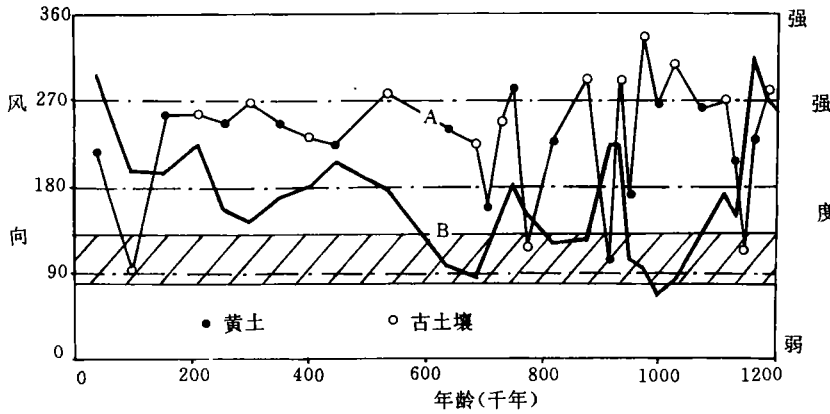


图4 黄土高原区1.2 MaBP以来冬季风主要风向(A)和相对强度(B)

90°为东;180°为北;270°为西;360°为南;B为两点平滑曲线

Fig. 4 Main wind direction(A)and relative intensity(B) on the loess plateau since 1.2 MaBP

条件:选取的剖面在同一平面上;粉尘沉积速率基本上受同一气候系统控制;粉尘沉积速率受控于风向(即沉积速率沿顺风向不断降低)及风的强度;区域内没有大的环流阻碍系统(如兰州高压)对粉尘沉积速率造成局部、区域性影响。

基于以上几点,我们选取黄土高原中部基本符合以上条件的洛川、西峰、宝鸡、刘家坡剖面做为平面上的四顶点,以其同一时间的粉尘沉积速率为各点上的“重力”,以重心到该平面的几何中心连线的方向为冬季风风向,以重心到几何中心的重力矩为冬季风强度(相对强度)。据此恢复的从1.2 MaBP以来<sup>①</sup>黄土高原区冬季主要风向及冬季风强度如图4所示。

从图中可看出,黄土高原区从1.2 MaBP以来主要风向总的变化趋势为从WNW向NW变化,即有顺时针变化的趋势;风的强度也有增强趋势。同时,风向在0.7 MaBP左右有一明显的转折点,在此以前风向变化剧烈,主要在WSW与NW之间来回摆动;在0.7 MaBP以后,风向基本稳定在NW方向。这与我国黄土分布的变化一致,即在松山世末之前,黄土南界由原先(第四纪初期)的太行山以西和秦岭以北移至辽东半岛、山东半岛、伏牛山到秦岭一线<sup>[10]</sup>,表明在此时段主风向以西风为主;松山世末以后,黄土南界推至长江下游沿岸,到末次冰期,黄土分布可达杭州湾以南<sup>[10]</sup>,表明在该段主风向以NW风为主。这也与陕西榆林市以北的红石峡剖面利用磁组构所建立的0.5 MaBP以来的古风向NW

一致<sup>[14]</sup>。0.7 MaBP以后的冬季风NW风向与现代该区冬季风风向基本相同。因此,可以认为,0.7 MaBP左右是东亚季风重要的调整时期,很可能也是现代东亚季风定型之时。

与此同时,风的强度在0.7 MaBP附近也有一个明显的转折点。在0.7 MaBP以前,强度变化较为剧烈,这与上面所述0.7 MaBP以前的风向变化剧烈的结论相对应;但在该时段,冬季风强度除了1.2 MaBP及0.9 MaBP前后的上下粉沙层(见图4L<sub>9</sub>、L<sub>15</sub>)形成时期较大外,总体强度不大。0.7 MaBP以后,冬季风的强度有明显逐步增强的趋势,这与0.7 MaBP以来的风向转向NW相对应。以上说明0.7 MaBP前后,现代东亚冬季风风向已基本稳定,但其强度自0.7 MaBP以来不断增强。这正好同大气环流模拟结果相一致,即青藏高原进入冰冻圈以后,随着其高度的不断增加,热力和动力作用对东亚季风环流的影响只是使其强度不断增加,而不会造成环流路径明显变化的结论一致。由此可知0.7 MaBP前后很可能也是青藏高原进入冰冻时期。这一推论与施雅风<sup>[11]</sup>通过大量资料的综合推导,认为最大冰期出现时间相当于深海氧同位素18~16阶段(0.72~0.52 MaBP)的结论基本一致。

总体上看,从1.2 MaBP以来,在间冰期(即古土壤发育时期)冬季风风向大致有从WNW向NW

<sup>①</sup> 因1.2 MaBP以前,洛川、西峰剖面与宝鸡、刘家坡剖面不具有明确的层位对应关系,故未进行冬季风风向和强度的计算。

少量偏转的趋势;在冰期(即黄土层堆积时期)冬季风风向大致为NW方向。说明冬季风环流在冰期、间冰期存在较明显的差别,但从中更新世到晚更新世这种差别逐渐减弱。风力强度自0.7 MaBP以来有明显的不断增强趋势。这很可能是青藏高原不断隆升,其热力作用不断增强,从而导致东亚季风环流不断加强的结果。

当然,在风向的恢复过程中,也存在异常点(见图4阴影部分),其风向基本在ENE方向,而这些点恰是气候转折的重要时期。其风向是否果真如此,或是由某剖面的局部侵蚀导致计算风向的失真,还待以后深入研究。

## 6 结论

(1)粉尘沉积速率是冬季风强弱变化的直接记录,研究粉尘沉积速率无疑对恢复冬季风的历史有重要意义。粉尘沉积速率研究表明,我国冬季风从2.4 MaBP以来,在时间上有阶段性增强的趋势,在空间上有从东南向西北递增的规律,并且,粉尘沉积速率异常增高时期与青藏高原强烈隆升时段吻合。

(2)1.2 MaBP以来黄土高原在冰期时冬季风风向以NW为主;在间冰期,冬季风风向大致从WNW向NW有少量偏转。大约在距今0.7 MaBP冬季风风向偏转至NW,风力强度明显地逐步增强。

(3)现代东亚季风定型以及青藏高原进入冰冻圈可能同步,并且它们的时期大约在距今0.7 MaBP左右。

致谢:本文承蒙潘保田教授指导并提出宝贵意见,特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 安芷生,Porter S C,Chappell J等.最近130Ka洛川黄土堆积序

- 列与格陵兰冰芯记录.科学通报,1994,39(24):2254~2256
- 2 陈发虎,张维信等.甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题.北京:科学出版社,1993.9~47
- 3 刘秀铭.甘肃西峰黄土磁性地层与磁化率各向异性研究.硕士论文,1986
- 4 Kukla G, An Zhisheng. Loess stratigraphy on central China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1989, 72: 203~225
- 5 李吉均,方小敏,马海洲等.晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起.中国科学,1996,26(4):311~322
- 6 刘东生等著.黄土与环境.北京:科学出版社,1985.44~81,332~336
- 7 刘嘉麒,陈铁梅,聂高众等.渭南黄土剖面报道年龄测定及十五万年来高分辨时间序列的建立.第四纪研究,1994,(3):193~202
- 8 马海洲.柴达木盆地湟水谷地沙漠黄土河湖阶地研究.博士论文,1996
- 9 Skackleton N J, et al. Accumulation Rate of Liess in Tadjikistan and China; Relationship with Global Ice Volume Cycles. Quaternary Proceedings. 1995, (4): 1~6
- 10 潘保田,李吉均,陈发虎.青藏高原:全球气候变化的驱动机与放大器(1).兰州大学学报(自然科学版),1995,32(1):120~128
- 11 施雅风,郑本兴,李世杰等.青藏高原东部最大冰期时代、高度与气候环境探讨.冰川冻土,1995,17(2):97~112
- 12 郑洪波.白鹿塬黄土磁性地质与最近800000年古气候历史研究.硕士论文,1989
- 13 孙建中,赵景波,孙秀英等.黄土,还要更老些.海洋地质与第四纪地质,1987,7(1):106~112
- 14 孙继敏,丁仲礼,刘东生等.黄土与古土壤磁组测定在建冬季风风向上的初步应用.科学通报,1995,40(21):1976~1987
- 15 朱照宇,丁仲礼等著.中国黄土高原第四纪古气候与新构造演化.北京:地质出版社,1994.18~46

## Temporal and Spatial Variations of the Loess Accumulation Rate and Its Significance on the Loess Plateau During Quaternary

Wu Haibin Chen Fahu Wang Jianmin

(Department of Geographical Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

### Abstract

The loess accumulation rates of Liujiapo, Luochuan, Xifeng, Baoji, Jiuzhoutai and Dadunling sections on the loess plateau were systematically studied in this paper. It was found that the (Continued on Page 156)

## Analysis on Sand Granularity and the Effects of Water and Heat Change on Environment —A Case Study in Gurbantonggut Desert

Wei Wenshou

(Xinjiang Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Wulumuqi 830011)

### Abstract

Gurbantonggut Desert is the second largest desert in China. It forms in an arid area far away from seas and oceans, and does not be affected by monsoon. Under the influence of the regional topography and western air current, a particular regional climatic environment forms. This paper mainly discusses the granular composition of surface sand in the different types of sand deserts (moving sand desert and fixed sand desert) in Gurbantonggut Desert, and the interrelation between sand granularity and heat transmission in sand layer and sand moisture content. The results of field observation and sample analysis show that heat transmission and moisture movement in sand layer as well as evaporation from sand surface of the different types of the desert are directly related to sand granular composition. Moreover, sand granular composition plays an important role in sensible heat and latent heat of sand surface and feedback of the desert to climate. Meanwhile, sand granularity and change process of water and heat transmission directly influence the survival rate and growth of plants in the desert, and have an important effect on desert climate and environment.

**Key Words** granularity water and heat transmission moisture content Gurbantonggut desert

---

(Continued from Page 151)

loess accumulation rates have increased step by step from past to present, and decreased from NW to SE in the same fashion, besides the variation from glacial to interglacial epoches. There were several periods of extremely high rates of the loess accumulation during Quaternary, which are coincided with the uplift events of the Qinghai-Tibetan Plateau. At about 0.7 MaBP, the winter monsoon had a remarkable change both in wind direction and intensity. Since then, the intensity of winter monsoon has become stronger and stronger, while the direction of winter monsoon has changed to northwest. This paper proved that the loess accumulation rate can be considered as one of the best indices to indicate the winter monsoon variations of the Loess Plateau.

**Key Words** loess accumulation rate time sequence winter monsoon

---

封面照片说明 青海湖现代沉积照片中水面出露部分为青海湖滨岸附近全新世湖滩岩,系滨岸带现代松散砂砾沉积后被碳酸盐胶结,固结成坚硬岩石。

水面以下绿色为藻类生物。滨岸带水下部分主要为细砂和粉砂沉积,具有不对称波浪波痕。

师育民