

香山北麓末次冰期风成沉积物粒度的空间变化研究

徐树建^{1,2}, 潘保田¹, 胡春生¹, 高红山¹

(1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
2. 临沂师范学院地理与旅游学院, 山东 临沂 276005)

摘要: 黄土的粒度被广泛地用作气候变化特别是冬季风强度变化和沙漠范围变迁的替代性指标。对宁夏中部陇西黄土高原北缘的香山北麓从北向南的七个样点末次冰期以来风成堆积物粒度的系统分析表明, 在末次冰期中, 影响沉积物粒度的因素主要是距离源区的远近和海拔高度, 而风力强度基本相似, 后期风化作用较小, 可以忽视。随着距离现代沙漠南缘距离的增加和海拔高度的增加, 沉积物的粒度都会相应减小。通过数学统计处理后的结果显示, 在较小的空间范围内, 海拔高度的影响比源区距离更重要。

关键词: 粒度; 黄土; 风成沉积; 香山北麓

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006) 02-0004-03

Study on Grain-size of the Aeolian Sediments in the Northern Fringe of Xiangshan Mountain During the Last Glacial

XU Shu-jian^{1,2}, PAN Bao-tian¹, HU Chun-sheng¹, GAO Hong-shan¹

(1. College of Resources and Environment, Lanzhou University, National

Laboratory of Western China's Environmental System, Lanzhou, 730000, China;

2. College of Geography and Tourism, Linyi Teachers University, Linyi, Shandong 276005, China)

Abstract: Grain size is the most fundamental property of sediment particles, affecting their entrainment, transport and deposition. The aeolian sand and dust has been taken as an important proxy of expansion and contraction of the desert during geological period. The signals of the desert evolution were well preserved in the aeolian deposits on the margin of the desert, which are effective to reconstruct the desert expansion and contraction. According to the dominant wind direction, generally NW-SE, the authors systematically studied 7 sections of Malan loess in the Northern fringe of Xiangshan Mountain during the Last Glacial period. Detailed granular analyses show the properties of temporal and spatial of the Malan loess, and reducing of the percentage of the sand from northwest to southeast. The study indicates a new linear correlation model of sand percentage with altitude and distance, and the altitude has a more influence to the sand fraction.

Key words: grain size; loess; aeolian sediments; the Northern fringe of Xiangshan Mountain

中国黄土以其分布广泛、沉积连续、蕴含环境信息丰富而与深海沉积、极地冰芯并称为全球变化研究的三大支柱。黄土的粒度被广泛地用作气候变化特别是冬季风强度变化和沙漠范围变迁的替代性指标^[1-3]。沉积物的粒度分析是分析沉积环境、沉积过程、搬运过程和搬运机制的重要手段之一^[4,5], 粒度分析已成功应用于风成沉积、海洋、湖泊、河流和浊流沉积环境的比较和鉴别上^[6-13]。由于沙漠内部沉积的不连续性, 难以获得直接指示沙漠变迁的沉积物。而源于沙漠的周边地区的风成沉积物却蕴含了大量的沙漠演化的信息。通过沙漠边缘丰富的风成堆积序列的研究, 不仅可以了解沙漠形成和演化的规律, 而且可以探讨我国西北内陆干旱区的干旱化过程和形成机制, 并且为沙尘暴和土地荒漠化的治理提供科学依据。同时, 沙漠—黄土边界带(过渡带)因其生态环境脆弱、时空上具有高度的不稳定性及对全球气候变

化反映敏感而成为研究全球变化的理想区域。

黄土的组成是具有一定的规律的, 其中 50~10 μm 为风成黄土的基本组分, 而 < 5 μm 的黏土矿物则称为附加组分^[14]。黄土粒径的分布整体来说存在差异。如刘东生将黄土高原分成砂黄土、黄土和黏黄土三个带。从接近沙漠的粗黄土带向远离源区的细黄土带, 黄土平均粒径从 32 μm 减到 15 μm 。从西北或北方吹来的气流所携带的粉尘粒径从西北向东南递减。粉尘堆积后, 风化或成壤作用会发生不同程度的变化, 而风化和成壤又存在明显的区域差异性。不同的研究者选用的粒径指标也不同, 这与各地的区域差异有关。鹿化煜等^[1]认为黄土中不同的粒级的古气候意义是不同的, 且粒级组分的分界线具有较强的区域性。较粗的颗粒含量变化与东亚冬季风强度变化正相关, 具有全球意义。< 2 μm 颗粒与风化成壤作用密切相关, 经常处于悬浮状态, 可以长距离

① 收稿日期: 2005-05-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“青藏高原各圈层相互作用综合研究”(G1998040811); 国家自然科学基金(40171010; 40471016, 40401007); 教育部重点项目(2003070017)资助

作者简介: 徐树建(1967-), 男, 山东临沂人, 临沂师范学院副教授, 博士研究生, 主要从事风成沉积物粒度与第四纪环境变化研究。

搬运。而 $> 63\ \mu\text{m}$ 的颗粒,可能指示了极强的冬季风或/和尘暴事件。丁仲礼等认为,把粒度仅仅理解为冬季风强度的反映,在相当程度上过于简单化。黄土中砂颗粒的含量,首先可能的是受沙漠位置的控制,因为它难以被吹扬至高空并作远距离搬运。只能以跃移和滚动方式作近距离的移动。当然,经过多次跃移也可以移动一定的距离,但基本上是一种近源沉积,因此可以用来反映沙漠范围的变动^[3]。所以,黄土的粒度变化实际上主要受控于三个因素:源区范围、风力强度和风化作用。粉尘颗粒受后期风化的影响是不可避免的。Derbyshire 等^[16]认为,所有的粒度指标不仅受风力强度的控制,还受到沉积后土壤形成过程的影响。如粉砂质的长石及其他不稳定矿物可能会风化成更细黏土矿物,或是物理风化为更细的颗粒。为了避免这种影响,Xiao 等^[8]采用黄土中受后期风化非常微弱的石英颗粒的中值粒径作为冬季风的替代指标。由于石英颗粒的分离需要很大的工作量,对样品较多的剖面采用这种方法是不大现实的。假如后期风化程度和成壤作用都较弱,那么粉尘颗粒所受到的后期影响应当是很小的,可以忽略。本研究区处于夏季风的西北边缘,夏季风对环境的影响较显著的,但是降水较少,古土壤的发育程度较弱,说明尽管存在风化成壤作用,对颗粒的细化作用可以忽略。即使成壤作用能够产生细粒组分,其贡献也是次要的。

已往关于风成沉积物粒度的研究多集中于某个剖面的粒度指标、粒度参数和粒度分布与气候变化的关系等方面,而对沉积物粒度的空间分布的研究不够深入,风成沉积物粒度的空间分异规律有待于进一步探究。本文试图在较小的范围内探讨沉积物粒度的空间变化规律及影响因素。

1 材料和方法

粒度分析的黄土古土壤样品主要来自陇西黄土高原北缘的香山北麓,香山位于宁夏回族自治区中卫县南部,面积 $1\ 528.1\ \text{km}^2$ 海拔高度 $1\ 900\ \text{m} \sim 2\ 300\ \text{m}$,主峰香山寺海拔 $2\ 361\ \text{m}$ 。我们沿香山北麓的 202 省道由北向南布设了南山台子、高家水、19 km 处、23 km 处、孙家井、红泉和孙寨柯七个样点,样点位置和海拔高度见表 1,剖面中样品的采集按照从下往上的顺序,采样间距为 5 cm 或 10 cm。

表 1 样点的概况与砂的百分含量					
样点	纬度	经度	海拔/m	距离/km	$> 63\ \mu\text{m}/\%$
南山台子	37°27' N	105°14' E	1316	16	55.11786
高家水	37°25' N	105°14' E	1371	18	53.108
19K M	37°22' N	105°14' E	1465	21	52.35308
23K M	37°20' N	105°14' E	1634	26	35.61174
孙家井	37°18' N	105°12' E	1785	33	29.99769
红泉	37°14' N	105°13' E	1819	39	26.57852
孙寨柯	37°10' N	105°16' E	1943	48	20.27271

样品的粒度分析是在兰州大学西部环境教育部重点实验室进行的。采用了较为彻底的前处理方法^[15],在每个样品中取 $0.3 \sim 0.5\ \text{g}$ 放入烧杯中,加入双氧水(H_2O_2),煮沸至完全去除有机质。然后加入稀盐酸煮沸除去碳酸盐,再加蒸馏水注满烧杯。静置 12 h 后,用橡皮管抽去上层水,加入 10 mL 浓度 $0.05\ \text{N}$ 六偏磷酸钠作为分散剂,在超声波振荡仪上振荡 7 min,然后在粒度仪上测量。所采用的粒度仪为 Malvern Instruments Ltd. 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪,该仪器非常先进,其测量范围为 $0.02 \sim 2\ 000\ \mu\text{m}$,粒径分辨率为 $0.01\ \mu\text{m}$ 。对高家水剖面 100 cm 处的同一黄土样品的 15 次重复测试结果表明,其体积平均粒径($D^{[4,3]}$)的标准偏差为 0.505,相对标准偏差为 2.464%,其中值粒径的

标准偏差为 0.379,相对标准偏差为 2.581%。说明样品的处理方法可行,粒度数据可靠。磁化率采用 Bartington MS2 型磁化率仪测量。

对七个剖面进行粒度和磁化率的分析后,结合野外的剖面描述和观察进行地层划分,确定末次冰期的风成沉积 L_1 ,然后计算各剖面 L_1 的平均值。其中砂的百分含量见表 1。

2 结果分析

大量的黄土粒度分析已经表明,大部分地区的黄土沉积主要由粉砂和黏粒组成,而砂粒($> 63\ \mu\text{m}$)的百分含量一般较低,从风成沉积学的角度分析^[5],砂粒物质由于其粒径较粗,一般只能以跃移的形式被搬运,即很难被风吹扬至高空而以悬移的形式输送。在没有植被的沙漠内部,以跃移运动的砂粒也可作远距离输送,但一旦离开沙漠,在地表植被的作用下,可很快沉积下来。

通过对新疆黄土的研究表明,南疆黄土、风积砂和黄土状土的分布在垂直方向上有明显的分带性,海拔 $1\ 250 \sim 1\ 450\ \text{m}$ 的河流沉积平原区,广泛分布有几米厚的黄土状土;海拔 $1\ 450 \sim 1\ 800\ \text{m}$ 的丘陵区为淡黄色、少胶结、无层理的风积砂分布带; $2\ 000 \sim 4\ 000\ \text{m}$ 以上分布黄土,直接披覆在基岩或阶地表面上。在昆仑山北坡黄土一般呈灰黄色、粉砂质,随海拔高度的升高逐渐变小。对昆仑山北坡的 17 个样点的表土的粒度分析可以看出,砂的百分含量随着海拔高度的升高呈逐渐降低的趋势。

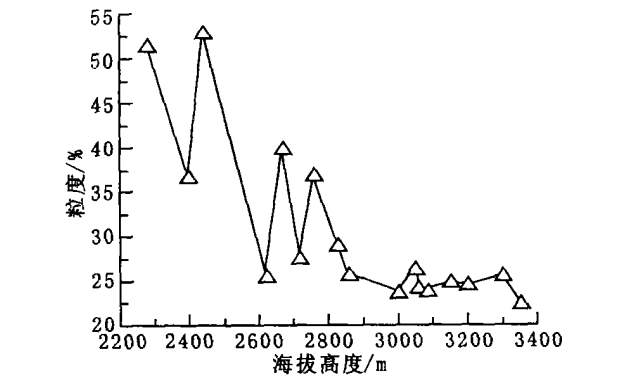


图 1 昆仑山北坡表土的粒度(砂的含量)与海拔高度的关系

对宁夏中部香山北麓从北向南的七个样点末次冰期以来风成堆积物粒度的分析结果(图 2、图 3)可以看出,砂的百分含量与距离现代沙漠南缘的距离和样点的海拔高度都呈显著线性相关,相关系数的平方分别为 0.976 5 和 0.943。所以我们可以对他们进行多元线性回归分析。把三列数据分别输入统计软件 SPSS11.5 的表格,运用全回归法进行多元线性回归分析,得到回归方程: $Y = -0.102X_1 - 0.054X_2 + 129.123$,其中 Y 为样点中 L_1 的砂($> 63\ \mu\text{m}$)的百分含量, X_1 为距离现代沙漠南缘的距离,单位是 km, X_2 为样点的海拔高度,单位是 m,方程的相关系数 R 为 0.988,说明砂的百分含量与沙漠南缘距离和样点海拔高度有很好的相关性,相关系数的平方 R^2 为 0.977,说明沙漠南缘距离和样点海拔高度这两个因素,可以解释砂百分含量这个指标的 97.7% 的变异性。同时,海拔高度和沙漠的距离的数据可能属于不同的数量级,我们进一步进行了数据的标准化处理,标准化后的方程为: $Y = -1.2032X_1 - 12.998X_2 + 39.006$,其相关系数不变。这说明海拔高度的影响比距离的影响更大。

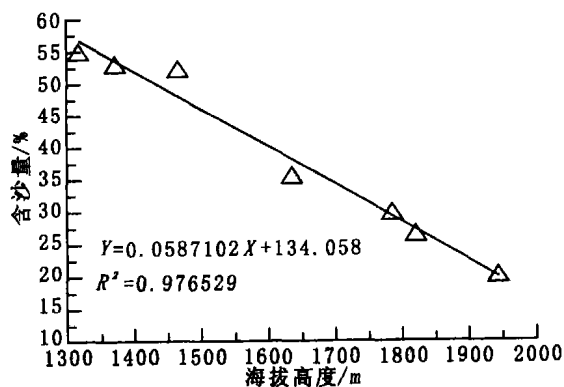


图 2 香山北麓砂的含量与海拔高度的关系

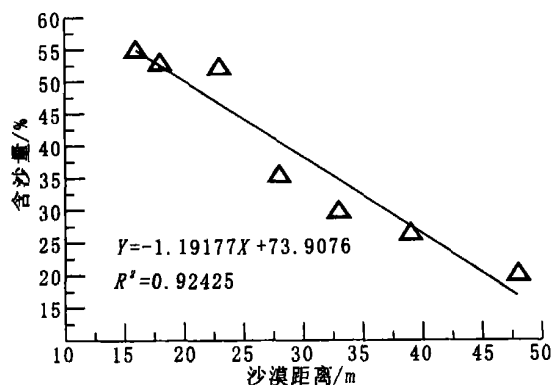


图 3 香山北麓砂的含量与沙漠距离的关系

3 讨论与结论

黄土的粒度变化主要受控于源区范围、风力强度和风化作用三个因素。本区位于夏季风的西北边缘, 风化成壤作用对粒度的细化可以忽略; 而在较小的范围内, 风力强度的变

参考文献:

- [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.
- [2] 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.
- [3] 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), 1999, 29(1): 82– 87.
- [4] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物) 粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1976. 1– 147.
- [5] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits [M]. Academic Press, 1987. 68.
- [6] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere [J]. Paleoceanography, 1998, 13(3): 215– 224.
- [7] Prins M A, Postma G, Weltje G. Controls on the terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: The Markran continental slope [J]. Marine Geology, 2000, 169: 351– 371.
- [8] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. 自然科学进展, 2001, 11(3): 269– 276.
- [9] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 最近 2.6 Ma 中国北方季风环流与西风环流演变的风尘沉积记录[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(6): 497– 504.
- [10] Chen F H, Feng Z D, Zhang J W. Loess particle size date indicative of stable winter monsoon during the last interglacial in the western part of the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2000, 39: 233– 244.
- [11] Xiao, J L, Porter, S C, An, Z S, et al. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130, 000 yr [J]. Quaternary Research, 1995, 43: 22– 29.
- [12] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录- 以沉积物粒度为例[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(6): 563– 568.
- [13] Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain size trends, based upon definition of “transport vectors” [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81: 47– 60.

化基本一致。已有的研究已经表明^[17~20] 间冰期波动过程中, 我国沙地范围变化非常大。在冰期气候发展到一定程度时, 沙漠分布同现代大致相同; 而在间冰期如全新世温暖期, 东部沙区基本为草原所覆盖, 西部沙区的沙漠范围也大大缩小。沙漠范围在全球或区域气候背景控制下的大幅度波动, 势必促使粉尘源区范围的改变, 从而导致在同一地点沉积下来的黄土粒度的变化。即使是现在由于人类活动的影响, 中国北方的沙漠向南前进了 3 个纬度, 约合 300 km。粉尘动力学^[5] 研究表明, 粉尘的粒径随着起尘风速增加而增加。同时, 粉尘输运也与风力强度密切相关。当然, 粉尘沉积的粒度也与源区距离有关。粉尘粒度空间格局的研究表明, 粉尘粒度向下风方向递减。Rea^[6] 等对太平洋粉尘沉积中石英粒度分布的研究也表明, 随着离源区距离的加大, 石英粒度有规律地向下风方向递减。因此, 对于黄土的粒度变化, 尤其是距离源区较近的剖面粒度变化, 其原因可能有两个方面。其一代表冬季风强度的变化, 其二代表源区距离的变化。自然, 冬季风强度和源区距离之间也是有关系的。在距离源区较近, 且源区环境可能有大的变化的地点, 源区距离的影响可能在粒度变化中起主要的贡献。

本文在研究分析中所采用的是马兰黄土的平均值, 而马兰黄土的上、中、下部的粒度差异是很大的, 不同深度的差别也很明显, 简单的平均可能掩盖了许多重要的信息。但我们认为平均值在冰期- 间冰期的时间尺度内是有重要意义的。

通过上面的分析, 我们至少得到以下认识:

(1) 在沙漠- 黄土边界带范围内, 影响风成沉积物粒度的因素主要是距离源区的远近和海拔高度, 因为在冰期时段内风力强度可以认为基本相似, 而沉积物的后期风化作用较小, 可以忽视。

(2) 顺着主导风向, 随着距离现代沙漠南缘距离的增加和海拔高度的增加, 沉积物的粒度都会相应减小。通过数学统计处理后的结果显示, 在较小的空间范围内, 海拔高度的影响比源区距离影响更大。

5.2 各排土钉的作用

从以上屈服区的分布图可以看出,上部土钉的作用主要是约束土钉墙上部土体,降低拉应力,控制拉裂、倾倒造成的上部土体的局部失稳,而对整体滑动的稳定性贡献较少。而中下部土钉的作用是降低该处土体的剪应力,控制着整体滑动稳定,在边坡失稳前,中下部土钉(特别是下部土钉)应力快速增长,土钉与周围土体的摩阻力逐渐到达峰值,最后土

钉被拔出边坡失稳。
数值模拟中降低土层的参数来模拟工程中边坡稳定系数的降低,得到的各层土钉最大应力和降低参数前的各层土钉最大应力如图 5 所示。下部土钉应力增长较大,而上部土钉应力增长很小,反映了对边坡整体滑动起控制作用的是下部土钉。

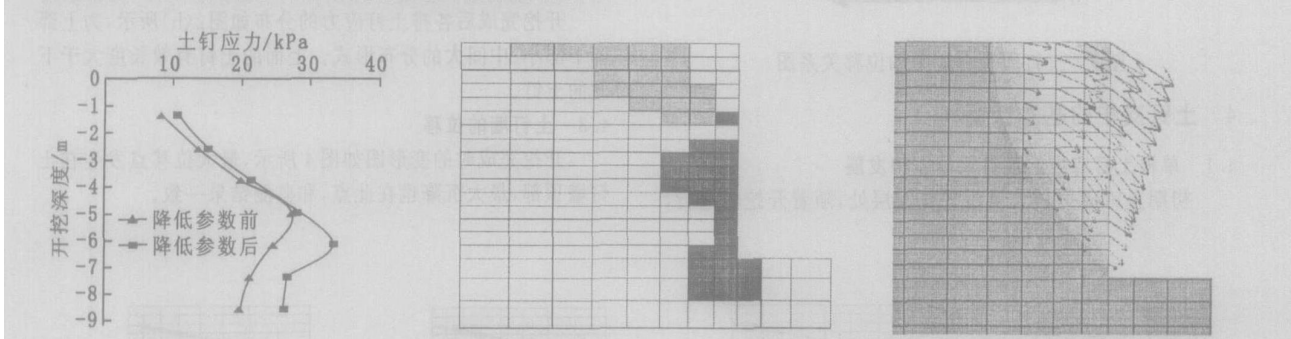


图 5 降低参数前后土钉应力曲线

图 6 改进施工方法的塑性区分布

图 7 潜在破裂面

5.3 施工程序对各排土钉应力大小的影响

土钉墙工程与其他各种基坑工程一样,施工对土钉内力的分布影响较大。不同的施工程序影响着各排土钉的应力大小和边坡的稳定。

锦贸大厦基坑在施工过程中,开始施工方法为一次性清理工作面至设定边壁,鉴于某些部位出现裂缝,因此改变了施工方法——预留几十厘米厚的保护层,待打入土钉后再挖除预留土。这样有效的减少了施工扰动,改进后的施工方法边坡未出现裂缝。

数值模拟改进的施工方法,不但塑性区的范围大大减小(见图 6),最大位移也从 32.5 mm 降至 15 mm。

5.4 潜在破裂面的型式

已有研究成果中对土钉设计中潜在破裂面的认识较多,其中较典型的有莫尔库仑破裂面、对数螺旋线破裂面等。图为开挖完成后坑壁的位移图和速度矢量图,潜在的滑裂面基本呈对数螺旋型,如图 7 所示,宽度约为 0.5 H。

5.5 设计中土钉长度的确定

目前关于土钉长短设置的看法一般有两种:上长下短和上短下长。通过前面的分析,认为土钉的布置应根据各自基坑的地质情况作相应的设计。一般情况下,上部土层较为松散,下部土层强度较大,而且下部土钉的有效长度较短,因此土钉可以设计为上部长下部稍短的形式。若上部土层强度很低,就应在该处做相应的加强以控制墙顶位移和地表裂缝。

参考文献:

[1] 赵其华,王兰生. 边坡地质工程理论与实践[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000.
[2] 何颖成,等. 土钉支护抗拔力研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 90- 92.

6 结 论

土钉墙的工作状态涉及因素繁多,作用机理复杂,因此加强监测和数值模拟工作对于探讨和研究土钉墙作用机理是非常有意义的。通过以上分析,可以对土钉墙的设计和施工有以下几点建议:

- (1) 土钉墙的破坏形式有上部的受拉破坏和下部的剪切破坏。
- (2) 对应于土钉墙的破坏形式,上部土钉的作用为降低上部土体的拉应力,减少地表裂缝,防止倾倒破坏和上部土层的局部失稳。
- (3) 下部土钉抑止下部土的剪切破坏,控制着土钉墙整体滑动稳定性。
- (4) 土钉布置一般可采取上长下短的形式,再针对具体情况对软弱部位加强。
- (5) 重视施工方法: 土钉墙的边坡变形、土钉应力都和施工程序有很大关系,超挖会引起土钉应力的急剧增大,因此应严格控制施工,在设置土钉之前保留一个保护层是有效减小边坡变形和土钉轴力的方法。
- (6) 遇含水量增大时,首先控制水的继续贯入,同时加密土钉。

(上接第 6 页)

[14] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 1- 412.
[15] 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2 535- 2 538
[16] Derbyshire, E, Kemp, R A, Meng, X M.. Variations in loess and palaeosol properties as indicators of palaeoclimatic gradients across the Loess Plateau of Northern China, Quaternary Science Reviews, 1995, 14: 681- 697.
[17] 董光荣, 陈惠忠, 王贵勇, 等. 150 ka 以来中国北方沙漠、沙地演化和气候变化[J]. 中国科学(B), 1995, 25(12): 1303- 1312.
[18] 董光荣, 靳鹤龄, 陈惠忠. 末次间冰期以来沙漠- 黄土边界带移动与气候变化[J]. 第四纪研究, 1997, (2): 158- 165.
[19] 董光荣, 李森, 李保生, 等. 中国沙漠形成演化初步研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(4): 23- 32.
[20] 董光荣, 王贵勇, 李孝泽, 等. 末次间冰期以来我国东部沙区的古季风变迁[J]. 中国科学(D), 1996, 26(5): 437- 444.