



## 论文

## 基于黄土粒度估算粉尘源区-沉积区距离的新方法

董欣欣\*, 杨石岭, 唐自华, 丁仲礼

中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029

\* E-mail: xxdong@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2016-03-28; 接受日期: 2016-05-23; 网络版发表日期: 2016-09-18

国家自然科学基金项目(批准号: 41402320)和国家重大科学研究计划项目(编号: 2015CB953804)资助

**摘要** 黄土的粒度分析是重建古气候的常用手段之一. 基于 Tsoar 和 Pye(1987)提出的粉尘搬运模型, 通过沿风力搬运方向的两个黄土剖面的粒度变化, 构建了定量估算粉尘源区-沉积区距离的模型. 采集环县和白马铺古土壤 S<sub>2</sub> 以上(250ka 以来)的粒度数据, 运用该模型得出了粉尘源区-沉积区的距离. 结果表明, 间冰期古土壤发育时期, 源区-沉积区距离较远, 沙漠南缘至环县剖面距离约为 340km; 冰期黄土堆积时期, 源区-沉积区距离较近, 沙漠南缘至环县剖面距离约为 100km. 该定量重建结果表明, 250ka 以来的冰期-间冰期旋回中, 沙漠南缘的进退变化距离约为 240km, 验证了东亚夏季风降水控制沙漠进退从而影响黄土-古土壤粒度变化的机制.

**关键词** 中国黄土, 粒度, 东亚夏季风, 源区-沉积区距离, 定量模型

## 1 引言

黄土高原的第四纪风成黄土-古土壤序列以其厚度大、时间跨度长、连续性好等优点成为亚洲季风系统演化的重要载体(Liu和Ding, 1998). 在重建该季风气候的研究中, 黄土的粒度组成是应用最早和最广泛的环境指标之一. 半个世纪以来, 研究者从黄土高原地区获得了大量不同时间尺度的粒度序列, 构建了多条粒度集成曲线(Ding等, 2002; Yang和Ding, 2014)和时间标尺(Ding等, 1994; Lu等, 1999a; Han等, 2011; Sun等, 2006), 定性或半定量地重建了冬季风强度变化或沙漠边缘进退历史, 但这两个环境要素

哪一个主导黄土-古土壤的粒度变化, 依然存在争议. 有学者曾尝试用不同模型将样品的粒度分布曲线分解成不同粒级的组分(Lu 等, 1999b; Sun等, 2002; Vandenberghe, 2013; 秦小光等, 2009), 然后把不同粒径区间(或分布)与粉尘搬运过程联系起来, 重建季风系统大气环流要素的变化. 但是, 这些模型主要集中在黄土粒度记录时间序列上的古大气环流要素重建, 如何运用数学模型通过空间粒度变化来提取源区范围变化信息亟需深入研究.

Tsoar和Pye的粉尘动力学模型(以下简称TP模型)显示, 粉尘沉积物的粒度既受空气流动状态影响, 也与粉尘搬运距离有关(Pye, 1987; Tsoar和Pye,

中文引用格式: 董欣欣, 杨石岭, 唐自华, 丁仲礼. 2016. 基于黄土粒度估算粉尘源区-沉积区距离的新方法. 中国科学: 地球科学, 46: 1406-1412, doi: 10.1360/N072016-00102

英文引用格式: Dong X X, Yang S L, Tang Z H, Ding Z L. 2016. A grain-size-based model for dust source-to-sink distance reconstruction: A case study from Chinese loess (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, 46: 1406-1412, doi: 10.1360/N072016-00102

1987), 关系如下:

$$L = \frac{\bar{U}2\varepsilon}{K^2D^4}, \quad (1)$$

式中,  $L$ 为粉尘的最大搬运距离(也就是粉尘源区-沉积区距离, 单位为m),  $\bar{U}$ 为水平风速( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\varepsilon$ 为垂直大气紊流交换系数( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )(这二者分别代表了空气在水平方向的运动速度和垂直方向上的迁移强度, 并在整个搬运区域保持不变),  $K$ 为空气常数(海平面上 $15^\circ\text{C}$ 时取值 $8.1 \times 10^7 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $D$ 为粉尘粒径(m).

显然, 依据单个剖面的粒度结果无法重建空气动力状态和搬运距离两个控制因素. 为定量重建粉尘源区-沉积区距离, 基于TP模型, 结合两个剖面的粒度数据, 利用粒度的空间分异建立了一种定量重建黄土高原粉尘源区-沉积区距离的新方法. 运用该方法, 还计算了古土壤 $S_2$ 以上的粉尘源区-沉积区距离变化, 并探讨了粉尘搬运距离变化与东亚季风系统之间的关系.

## 2 模型的建立和特征粒径的选择

### 2.1 模型基础和前提假设

由TP模型的表达方程(式(1))可见, 从单个剖面的研究中可以测量的参数只有沉积物粒径 $D$ . 若要依据粒度数据从该方程中得到其他变量, 可以采用多个多元方程联立求解的方法, 即利用一定区域内多个剖面的粒度结果建立差值模型, 计算出粉尘源区-沉积区距离的变化以及不同时期空气流动状态的差异.

TP模型假设: (1) 粉尘粒径必须在 $1\sim 50\mu\text{m}$ 之间, 其在空气中的运动才符合斯托克斯法则; (2) 同一时期水平风速 $\bar{U}$ 和大气垂直紊流交换强度 $\varepsilon$ 在空间上不发生变化, 即 $\bar{U}2\varepsilon$ 乘积不变(Pye, 1987; Tsoar和Pye, 1987), 本模型基于TP模型, 因此必须满足上述两个假设.

另外, 为了简化模型参数, 有如下假设: (1) 每个黄土样品反映了该样品堆积期间大气粉尘搬运和沉积的平均状态; (2) 由于现代观测中粉尘湿沉降所占比例很小( $<5\%$ )(Zhang等, 1993), 粉尘的湿沉降过程忽略不计; (3) 从粉尘吹扬到沉积的过程中, 新加入的粉尘忽略不计.

### 2.2 模型推导

基于以上假设, 考虑如下过程: 在同一场风中,

不同粒径的两个颗粒 $D_A$ 和 $D_B$ ( $D_A > D_B$ ), 从同一源区O点出发, 沿风力搬运方向悬浮搬运, 经过各自的最大搬运距离 $L_A$ 和 $L_B$ 后分别沉积在A位置和B位置(粗颗粒先沉积,  $L_A < L_B$ ), A、B之间的距离为 $d$ (图1). 显然

$$L_B = L_A + d. \quad (2)$$

由于两个颗粒的搬运过程均符合TP模型, 则有

$$L_A = \frac{\bar{U}2\varepsilon}{K^2D_A^4}, \quad (3)$$

$$L_B = \frac{\bar{U}2\varepsilon}{K^2D_B^4}. \quad (4)$$

粉尘搬运过程中, 由于同一风力体系中水平风速 $\bar{U}$ 和大气垂直紊流交换强度 $\varepsilon$ 不变, 可解得搬运距离 $L_A$ 、 $L_B$ , 分别为

$$L_A = \frac{dD_B^4}{D_A^4 - D_B^4}, \quad (5)$$

$$L_B = L_A + d = \frac{dD_A^4}{D_A^4 - D_B^4}. \quad (6)$$

显然, 本模型定量刻画了同一风力体系中, 不同剖面粉尘的粒径差值与剖面之间距离的比例关系. 依据这种关系, 即可定量计算研究点到粉尘源区的距离.

### 2.3 选取特征粒径

一般来说, 沉积物的粒度测量结果是连续分布的. 如何确定符合模型计算要求的特征粒径( $D_c$ ), 使之对应的 $L$ 最好地反映出源区-沉积区距离, 就成为模型应用过程中至关重要的一环. 理论上, 可准确反映源区距离的特征粒径 $D_c$ 应符合三个基本要求: (1) 空气中的运动特征符合斯托克斯法则; (2) 搬运过程中分选稳定; (3) 对源区距离变化响应敏感.

TP模型认为, 粒径 $1\sim 50\mu\text{m}$ 之间的颗粒在空气中的运动特征符合斯托克斯法则. 从前人的实测结果也可以发现, 黄土高原大多数剖面 $1\sim 50\mu\text{m}$ 间的颗粒是主要组分(Ding等, 2002; Yang和Ding, 2008). 因此,

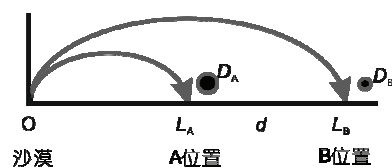


图1 不同粒径颗粒的搬运距离

本模型在实际应用中只使用1~50 $\mu\text{m}$ 区间的粒度数据. 确定了特征粒径的区间1~50 $\mu\text{m}$ 后, 将该区间的颗粒含量标准化到100%. 其分选的稳定程度可以从累积粒度频率曲线上观察到(图2). 在距离源区远近不同的两个沉积剖面上, 累积粒度频率在1 $\mu\text{m}$ 或50 $\mu\text{m}$ 附近没有差别. 二者之间, 存在一个累积频率曲线接近平行的区间, 且两个剖面累积粒度频率差值也在这个区间保持稳定(如图2a和b中灰色长方形包含的区域, 即 $x\sim y\%$ 区间), 该粒径范围内的颗粒可以视为风力搬运过程中在两个研究点之间稳定分选的组分.

TP模型描述了粒径为 $D$ 的颗粒在特定风场中的最大搬运距离 $L$ , 则搬运距离超过 $L$ 后, 样品中不再含有粒径大于 $D$ 的颗粒, 暗示粗颗粒对源区距离更敏感. 这一推测也被黄土高原粉尘粒度的空间变化所证实: 砂粒级含量在离开沙漠边缘极短的距离内成指数降低(Ding等, 2005; Yang和Ding, 2008). 因此, 将1~50 $\mu\text{m}$ 范围内、稳定分选粒级区间的上限 $y\%$ 对应的粒径值作为计算源区距离的特征粒径 $D_c$ . 显然, 选取的特征粒径 $D_c$ 是稳定分选组分中最粗的粒径值, 由于颗粒越粗最大搬运距离越小(式(1)), 因此利用该特征粒径计算所得的搬运距离是粉尘源区至沉积剖面的最小距离, 可以视为沙漠边缘至沉积剖面的距离.

### 3 模型应用实例

根据TP模型, 沿着粒度等值线的法线、指向粒度变细的方向即可视为风力搬运方向. 基于53个剖面

的粒度数据, 已经构建了黄土高原倒数第二次间冰期( $S_2$ )以来的粒度等值线(Yang和Ding, 2008). 沿着该粒度等值线的法线方向, 选取黄土高原北部的环县(36.65°N, 107.26°E)和白马铺(35.89°N, 107.73°E)剖面(图3, 两剖面相距94.5km), 运用本模型尝试重建粉尘源区-沉积区距离.

研究剖面的粒度数据(图4)来自Yang和Ding(2008), 年龄模式采用黄土高原千年尺度粒度集成序列(CHILOMOS)(Yang和Ding, 2014). 根据粒度曲线(图4)与CHILOMOS集成记录的对比, 首先确定了两个剖面的等时面, 并选择了典型沉积层位样品.

选取样品粒度结果中1~50 $\mu\text{m}$ 间的数据做进一步分析. 结果显示, 在1~50 $\mu\text{m}$ 范围内, 样品的累积粒度曲线在30~70%之间均呈现比较稳定的斜率(图5a中灰色长方形包含的区域), 两个剖面同时期样品的累积粒度差值也在30~70%之间最稳定(图5b灰色长方形包含的区域). 据此, 认为累积频率30~70%区间代表了风力搬运过程中经历了稳定分选的粉尘颗粒. 因此, 将该区间的上限累积频率70%对应的粒径(记为 $D_{c70}$ )确定为本模型计算所需的特征粒径.

然后将白马铺(图6a)和环县(图6b)各典型沉积层位的特征粒径 $D$ 和两个剖面之间的距离 $d$ , 分别代入式(5), 即可获得各典型层位堆积时环县剖面与粉尘源区之间的距离(图6c). 结果表明, 在冰期黄土堆积时, 粉尘源区-环县剖面的距离较近, 如在MIS 2( $L_{1-1}$ )和MIS 6( $L_{2-3}$ )时段源区至环县的距离大约100km; 在间冰期古土壤发育时, 粉尘源区-环县剖面的距离较

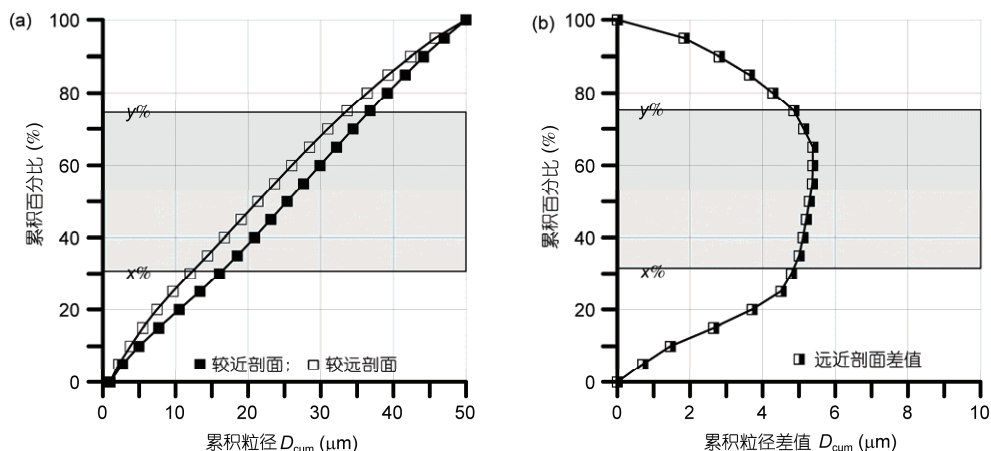


图2 1~50 $\mu\text{m}$  累积粒度频率曲线概念模式(a)以及达到相同累积百分比时源区-沉积区距离不同的两个剖面累积粒径差值(b)

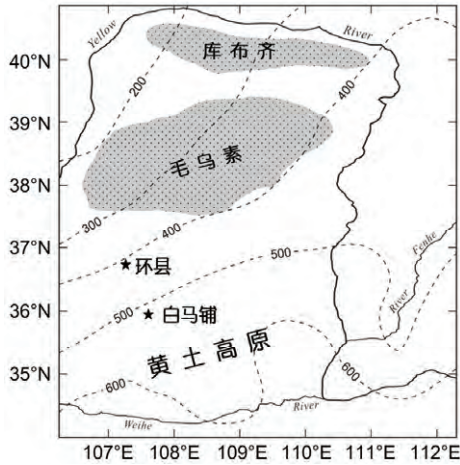


图3 环县剖面和白马铺剖面以及附近沙漠的现代位置图

远, 如在MIS 5( $S_1$ )和MIS 7( $S_{2-1}$ )发育时源区至环县距离约为340km. 与冰期相比, 间冰期粉尘源区至沉积

区的距离增加了约240km.

#### 4 讨论

在TP模型(Pye, 1987; Tsoar和Pye, 1987)的基础上, 首次尝试利用风力搬运路径上两个黄土剖面的粒度值重建粉尘源区-沉积区距离. 黄土-古土壤堆积源区-沉积区距离变化与粒度变化趋势非常吻合(图6), 并且具有如下特点: (1) 间冰期古土壤发育时期源区-沉积区距离大(约340km), 冰期黄土堆积时期源区-沉积区距离小(约100km); (2) 与冰期相比较, 间冰期粉尘源区-沉积区距离增加了240km以上.

黄土粒度的古气候意义一直存有争议. 一些学者认为黄土-古土壤的粒度变化反映了冬季风风力的强弱, 因为从动力学角度看, 冬季风风力越强, 从北到南输送粉尘的能力越强, 其搬运的粉尘颗粒应越

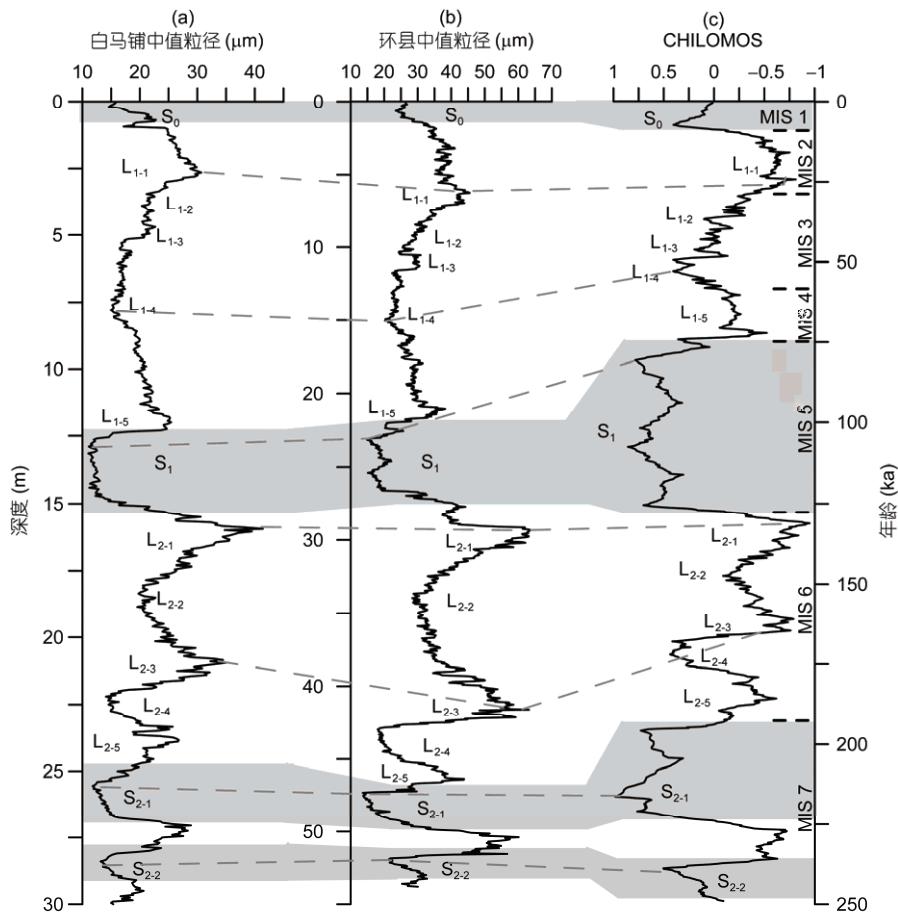


图4 白马铺(a)和环县剖面(b)中值粒径记录与黄土高原千年尺度粒度集成序列(CHILOMOS)(Yang 和 Ding, 2014)(c)对比



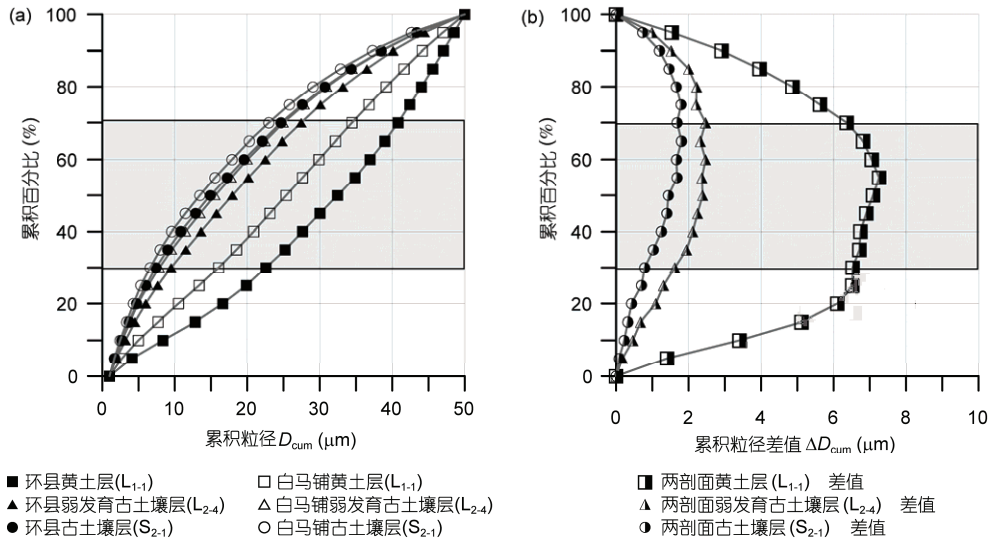


图 5 环县和白马铺样品的累积粒度频率曲线(a)以及环县和白马铺样品相同累积百分比对应粒径的差值(b)

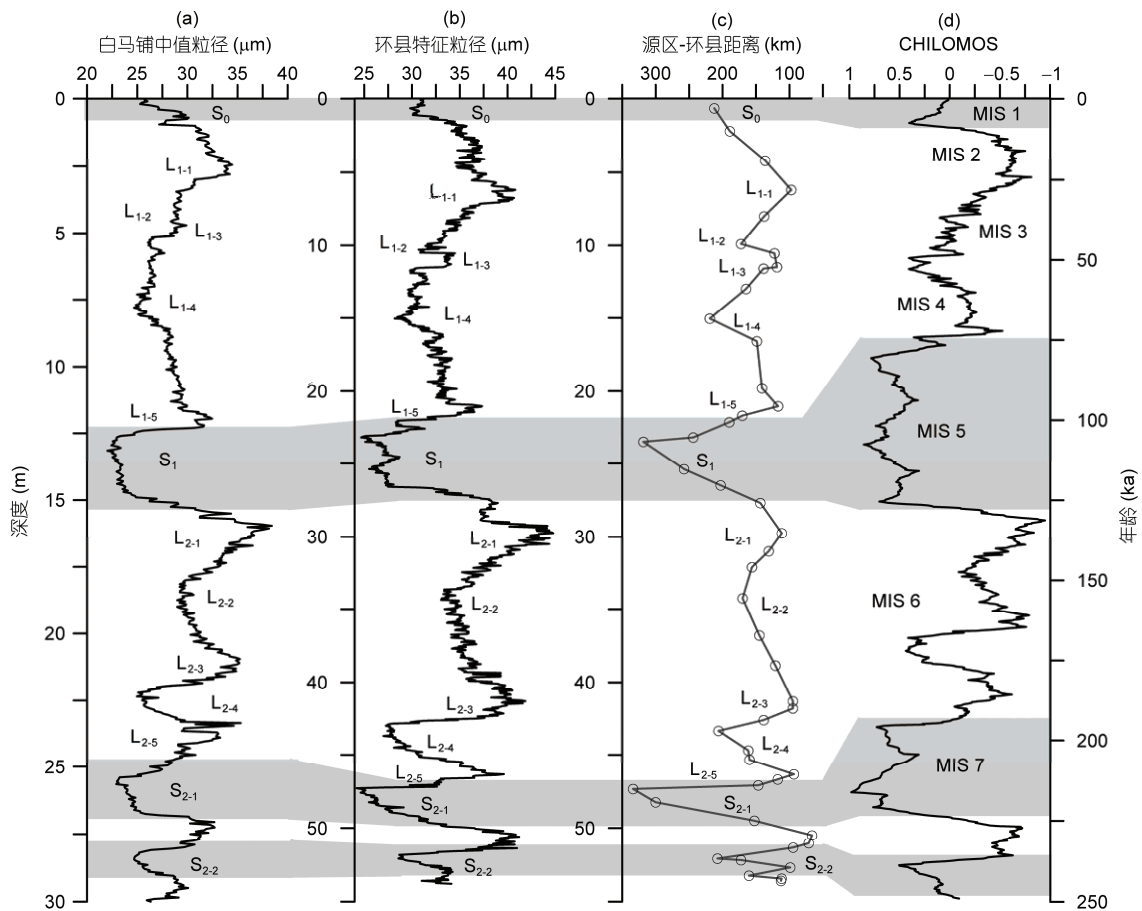


图 6 白马铺剖面(a)和环县剖面(b)特征粒径曲线、本模型计算出的源区-环县剖面距离(c)以及 CHILOMOS 年龄模式(d)

CHILOMOS 年龄模式据 Yang 和 Ding(2014)

粗(An等, 1991; Ding等, 1992; Lu等, 1999b; Porter, 2001; Xiao等, 1995); 另一些学者认为夏季风雨带进退对黄土-古土壤粒度的影响是第一位的(Ding等, 2005; Yang和Ding, 2004, 2008), 即夏季风强弱直接决定了季风降水带北缘的位置和降水量, 导致沙漠扩张或收缩(源区-沉积区距离发生变化), 从而影响黄土的粒度. 本文模型计算的冰期-间冰期源区-沉积区距离变化不仅与Yang和Ding(2008)依据粒度等值线变化确定的沙漠边界移动幅度高度吻合, 也与冰期-间冰期C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>植被分布反映出的季风雨带迁移距离(Yang等, 2015)一致, 亦可与中国北方沙漠/沙地边界变化的直接调查结果相对比(Lu等, 2013). 这些证据一方面表明模型的构建方法和估算结果是比较可靠的, 另一方面也为“黄土粒度变化主要受夏季风雨带进退控制”的观点(Ding等, 2005; Yang和Ding, 2004, 2008)提供了独立证据.

尽管从理论上讲, 通过同样的方法还可以得到 $\bar{U}2\varepsilon$ 这一表征空气流动状况的参数, 但是目前还无法从这一参数中进一步得出水平风速 $\bar{U}$ 和大气垂直紊流交换强度 $\varepsilon$ , 因此难以讨论水平风速的变化. 另外, TP模型对粉尘搬运过程的刻画、本模型中特征粒径的选取标准等尚需进一步研究和完善; 本模型是否适用于其他黄土区也有待验证.

## 5 结论

本研究提出了一种利用两剖面黄土-古土壤粒度联立解析源区-沉积区距离的新方法. 运用该方法得到的冰期-间冰期源区距离变化与粒度等值线重建的沙漠边界移动幅度(Yang和Ding, 2008)、C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>植被重建的季风雨带迁移幅度(Yang等, 2015)是吻合的, 说明该方法用于源区-沉积区距离定量重建是可行的. 此外, 本研究结果表明, 250ka以来的冰期-间冰期旋回中, 沙漠南缘的进退变化距离约为240km, 进一步验证了东亚夏季风降水控制沙漠进退并最终影响黄土-古土壤粒度变化的机制. 毋庸置疑, 本文的模型也存在一些不足, 更广泛的应用还有待更多实测数据的验证和模型的进一步改进.

**致谢** 汉景泰研究员、鹿化煜教授、张仲石教授、秦小光副研究员、陈祚伶博士对模型提出了宝贵意见, 三位

审稿人对本文修改提供了热忱帮助, 在此表示衷心的感谢.

## 参考文献

- 秦小光, 蔡炳贵, 穆燕, 宁波, 殷志强. 2009. 黄土粉尘搬运过程的动力学物理模型. *第四纪研究*, 29: 1154–1161
- An Z, Kukla G, Porter S C, Xiao J. 1991. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 18: 125–132
- Ding Z, Derbyshire E, Yang S, Sun J, Liu T. 2005. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 237: 45–55
- Ding Z, Derbyshire E, Yang S, Yu Z, Xiong S, Liu T. 2002. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea  $\delta^{18}\text{O}$  record. *Paleoceanography*, 17: 5-1–5-21
- Ding Z, Rutter N, Han J, Liu T. 1992. A coupled environmental system formed at about 2.5 Ma in East Asia. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeconol*, 94: 223–242
- Ding Z, Yu Z, Rutter N W, Liu T. 1994. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quat Sci Rev*, 13: 39–70
- Han W, Fang X, Berger A, Yin Q. 2011. An astronomically tuned 8.1 Ma eolian record from the Chinese Loess Plateau and its implication on the evolution of Asian monsoon. *J Geophys Res-Atmos*, 116: D24114
- Liu T, Ding Z. 1998. Chinese loess and the paleomonsoon. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 26: 111–145
- Lu H, Liu X, Zhang F, An Z, Dodson J. 1999a. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan, central Chinese Loess Plateau. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeconol*, 154: 237–246
- Lu H, Van-Huissteden K, An Z, Nugteren G, Vandenberghe J. 1999b. East Asia winter monsoon variations on a millennial time-scale before the last glacial-interglacial cycle. *J Quat Sci*, 14: 101–110
- Lu H, Yi S, Xu Z, Zhou Y, Zeng L, Zhu F, Feng H, Dong L, Zhuo H, Yu K, Mason J, Wang X, Chen Y, Lu Q, Wu B, Dong Z, Qu J, Wang X, Guo Z. 2013. Chinese deserts and sand fields in Last Glacial Maximum and Holocene Optimum. *Chin Sci Bull*, 58: 2775–2783
- Porter S C. 2001. Chinese loess record of monsoon climate during the last glacial-interglacial cycle. *Earth-Sci Rev*, 54: 115–128
- Pye K. 1987. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. London: Academic Press Inc. 334
- Sun D, Bloemendal J, Rea D, Vandenberghe J, Jiang F, An Z, Su R. 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sediment Geol*, 152: 263–277
- Sun Y, Clemens S C, An Z, Yu Z. 2006. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records

- from the Chinese Loess Plateau. *Quat Sci Rev*, 25: 33–48
- Tsoar H, Pye K. 1987. Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology*, 34: 139–153
- Vandenberghe J. 2013. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification. *Earth-Sci Rev*, 121: 18–30
- Xiao J, Porter S C, An Z, Kumai H, Yoshikawa S. 1995. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130000 yr. *Quat Res*, 43: 22–29
- Yang S, Ding Z. 2004. Comparison of particle size characteristics of the tertiary ‘red clay’ and pleistocene loess in the Chinese loess plateau: Implications for origin and sources of the ‘red clay’. *Sedimentology*, 51: 77–93
- Yang S, Ding Z. 2008. Advance-retreat history of the east-Asian summer monsoon rainfall belt over northern China during the last two glacial-interglacial cycles. *Earth Planet Sci Lett*, 274: 499–510
- Yang S, Ding Z. 2014. A 249 kyr stack of eight loess grain size records from northern China documenting millennial-scale climate variability. *Geochem Geophys Geosyst*, 15: 798–814
- Yang S, Ding Z, Li Y, Wang X, Jiang W, Huang X. 2015. Warming-induced northwestward migration of the east Asian monsoon rain belt from the last glacial maximum to the mid-holocene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 13178–13183
- Zhang X, Arimoto R, An Z, Chen T, Zhang G, Zhu G, Wang X. 1993. Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: Concentrations, sources and atmospheric deposition on the loess plateau. *Atmos Environ Part A-General Topics*, 27: 2051–2067