

穆燕, 秦小光, 殷志强. 2009. 黄土高原南部末次冰期以来沙尘气溶胶的气候效应 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 172–182. Mu Yan, Qin Xiaoguang, Yin Zhiqiang. 2009. Climate effect of dust aerosol in southern Chinese Loess Plateau since the last glacial period [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 172–182.

黄土高原南部末次冰期以来沙尘气溶胶的气候效应

穆燕¹ 秦小光¹ 殷志强²

1 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
2 中国地质环境监测院, 北京 100081

摘要 沙尘气溶胶是地球上分布最广的自然气溶胶类型之一, 也是气候系统中的重要成分。沙尘天气严重影响人类生产、生活和居住环境, 对气候变化也存在显著作用。近年来, 沙尘气溶胶的气候效应得到越来越多的关注和研究, 但人们的工作主要集中在对现代沙尘气溶胶的研究, 而对过去沙尘气溶胶气候效应的研究不多。本研究利用黄土粒度及沉积特征, 根据现代沙尘暴的沉降特点, 研究了 60 kaB. P 以来中国黄土高原南部地区沙尘气溶胶的辐射效应, 结果表明: 1) 沙尘气溶胶产生的辐射效应主要表现在造成行星系统太阳辐射反射量的普遍增加, 即沙尘过程具有明显的降温效应。2) 气候效应上主要表现为对气候的负反馈。由沙尘粒度引起的行星反照率在全新世适宜期达最大值, 而在冰期有最小值出现; 在气候降温事件中, 沙尘气溶胶造成行星反照率降低; 每一次降温事件发生时气溶胶的降温效应会相应减弱。约 60 kaB. P 以来沙尘气溶胶给年均温度带来的影响是使其平均降幅在 -0.8 K 左右。3) 利用黄土的粒度分布, 结合现代气溶胶的观测可以估算地质时期沙尘气溶胶的气候效应。

关键词 末次冰期 沙尘气溶胶 光学特性 辐射强迫 气候效应

文章编号 1006-9585 (2009) 02-0172-11 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

Climate Effect of Dust Aerosol in Southern Chinese Loess Plateau Since the Last Glacial Period

MU Yan¹, QIN Xiaoguang¹, and YIN Zhiqiang²

1 Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
2 China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081

Abstract Dust aerosol is one of natural aerosols and plays an important role in the climate system. In recent years, more and more investigators began to pay attention to the climate impact of dust aerosol. However, most studies were mainly focused on modern dust aerosol. Researches on the climate effect of dust aerosols in Quaternary was few. In the study, the climate effect of dust aerosol in the south of Chinese Loess Plateau over the past 60 kaB. P was studied by using the grain size distribution and the settlement velocity of loess deposition. The radiative effect of dust aerosols was usually to result in an increasing albedo of the earth-atmosphere system that therefore leaded climate cooling. The climate effect of dust aerosols was a negative feedback. The albedo of the earth-atmospher-

收稿日期 2008-01-24 收到, 2009-01-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40472094 和 40772212

作者简介 穆燕, 女, 1983 年出生, 硕士, 主要从事第四纪全球变化方向的研究。E-mail: muyan@mail.iggcas.ac.cn

ic system increased during the warm Holocene Optimal but decreased during the last glacial period. During Heinrich cooling events, the cooling effect of dust aerosols was lower and did not reduce the air temperature of the earth system. Over the past 60 kaB. P., average annual temperature effect of dust aerosol was about -0.8 K. It is possible to estimate the climate effect of dust aerosol in past by using the grain size distribution and the settlement velocity of loess-paleosol formations.

Key words the last glacial period, dust aerosol, optical property, radiation forcing, climate effect

1 引言

大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固态或液态颗粒共同组成的多相体系, 粒径范围一般在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间 (戴丽莉, 2007)。按其成分的不同可分为六大类七种气溶胶粒子: 沙尘气溶胶、碳气溶胶 (黑碳气溶胶、有机碳气溶胶)、硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶、海盐气溶胶 (Kinne et al., 2001; 张小曳, 2007)。大气气溶胶的气候效应, 既包含它与太阳辐射和地球辐射的相互作用, 也具有动力学的变化, 尤其是气溶胶的辐射吸收加热的动力效应。其中辐射效应是气溶胶影响气候的主要途径, 即气溶胶层吸收太阳的短波辐射, 起到增暖大气、冷却地表的作用 (Hinds, 1998; 罗燕等, 2006)。对于长波辐射, 气溶胶的主要作用是冷却大气、增暖地表, 但是短波辐射强迫值要远大于长波辐射 (罗燕等, 2006)。根据现代大气研究者的成果表明, 一方面, 弱吸收性气溶胶的散射作用增加了向空间的后向散射, 减少了进入地气系统的能量, 引起该系统的冷却效应; 而吸收性较强的气溶胶, 通过吸收太阳辐射以减少地气系统的太阳辐射损失, 从而增加系统的能量输入, 引起净加热效应 (章澄昌等, 1995)。另一方面, 地表反照率对气溶胶的辐射效应也有着重大的影响。

沙尘气溶胶是最主要的和最广泛分布的自然气溶胶类型 (姚济敏等, 2006), 也是气候系统中最有效的成分之一 (Harrison et al., 2001)。沙尘天气对人类生产生活和居住环境造成严重的影响, 对气候变化也产生了重要的作用 (Derbyshire, 2003; Badarinath et al., 2007)。因此, 近几十年来, 沙尘气溶胶的气候效应得到越来越多的关注和研究。对沙尘气溶胶的辐射变化和气候效应的研究, 主要包括直接辐射效应和间接辐

射效应 (王耀庭等, 2005; 张小曳, 2007) 2 个方面。直接辐射效应是指气溶胶通过对太阳辐射的散射和吸收, 影响地气系统辐射场的变化, 产生与温室气体相反的辐射强迫, 进而影响气候 (Park et al., 2005)。这一结果主要取决于沙尘气溶胶的光学特性, 即消光系数、光学厚度、单次散射反照率、散射不对称因子等。主要的间接效应则是以云凝结核 (CCN) 的形式改变云的光学特性和云的分布而间接地影响气候 (王明星等, 2001), 实际为气溶胶的微物理作用, 即气溶胶的转化和气溶胶的清除 (主要是通过云、降雨过程的湿清除) (章澄昌等, 1995)。

近年来, 针对沙尘天气的特点, 不同的研究者用不同的方法对现代沙尘气溶胶进行观测研究, 总体来说可以归结为两个方面。一方面, 地面观测和现场采样。例如, 利用激光粒谱仪取得沙尘天气条件下沙尘粒子的数浓度采样材料, 通过统计分析, 总结出近地面沙尘气溶胶的粒谱分布规律, 再根据米散射理论计算出它的消光系数 (成天涛等, 2005; 姚济敏等, 2006); 用太阳光度计测量太阳直射光强, 反演得出气溶胶光学厚度及其他光学特性因子 (车慧正等, 2005; 李霞等, 2005); 用不同的采样器如 Anderson 采样器、HV-1000 大流量采样器在距地面 2 m 左右高度分别直接采样、观测 (牛生杰等, 2001a; 权建农等, 2005); 另一方面, 采用地面激光雷达观测、数值模拟、气象卫星等手段开展研究工作 (吴润等, 2004)。例如, 采用气象卫星遥感技术, 跟踪沙尘天气的发生, 揭示沙尘天气的时空分布特征以及沙尘光学特性 (高庆先等, 2004), 等等。申彦波等 (2003) 利用太阳光度计测得敦煌地区 4 月沙尘气溶胶的光学厚度在 1.2~3.0 之间波动; 吴润等 (2004) 利用数值模拟的方法测得我国北方地区春季沙尘气溶胶对太阳辐射的削弱作用, 导致温度在 $-0.6 \sim -1.2$ K 之间显著变化。

到目前为止, 研究者的工作主要集中在对现代大气气溶胶的观测研究, 并取得了显著的成绩。然而对第四纪末次冰期以来沙尘气溶胶气候效应的研究却不多。黄土高原作为一种风成的沙尘堆积, 它的黄土和古土壤沉积序列比较完整地记录了约2 600 kaB. P 以来全球的气候变化特征 (刘东生等, 1985), 也比较全面地反映了 2 600 kaB. P 以来沙尘天气发生的环境条件 (刘东生等, 1985; 刘兴诗, 2007)。因此在第四纪末次冰期以来, 沙尘气溶胶的光学特性、气溶胶对气候的反馈以及在 Heinrich 等气候事件中的反映等方面的估算, 对于研究该时期的气候变化具有重要的意义。本文通过对渭南地区 60 kaB. P 以来黄土古土壤地层的系统分析, 利用其粒度分布特征, 并参考现代沙尘气溶胶的观测结果, 反演重建当时沙尘的光学特性, 分析末次冰期间冰期旋回中沙尘气溶胶气候效应的变化特征。

2 采样地点与测试分析

渭南黄土剖面位于黄土高原南部, 采样年龄主要限于末次冰期 60 kaB. P 以来。前人的研究结果表明, 该剖面的黄土特性代表了黄土高原南部

的气候变化特征 (刘嘉麒等, 1994; 秦小光等, 2004)。

采样点 (如图 1) 位于陕西省渭南市阳郭镇 ($34^{\circ}34'N$, $109^{\circ}32'E$), 剖面厚约 7.5 m, 以 20 cm 间距 (部分 10 cm) 连续采集了 $S_0 \sim L_1$ 的 70 个样品。

粒度分析实验在中国科学院地质与地球物理研究所粒度实验室完成 (Qin et al., 2005)。实验过程简单介绍如下 (Qin et al., 2005): 1) 前处理。取大约 0.2 g 样品, 放入烧杯, 加浓度为 30% 的双氧水并加热煮沸, 待气泡停止后取下烧杯, 加 15% 的盐酸, 然后静止 24 h。2) 用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪完成粒度分布结果。仪器测试范围为 $0.02 \sim 2\ 000\ \mu m$, 测试误差小于 1%。所测值为体积相对百分含量。

实验结果表明, 渭南黄土的粒度分布主要以粒径小于 $75\ \mu m$ 的悬浮颗粒为主 (秦小光等, 2004)。

3 沙尘气溶胶辐射强迫估算模型

3.1 计算方法

弱吸收性的沙尘气溶胶, 其消光作用的强弱主要由气溶胶的散射决定 (章澄昌等, 1995; Hinds, 1998)。在其辐射效应中, 消光系数、光学厚度、单次散射反照率、不对称因子等光学特性参数起到了主导性的作用 (成天涛等, 2002; 吴润等, 2005)。前人的研究表明黄土是沙尘形成的风成堆积 (申彦波等, 2003), 其颗粒组成与现代的沙尘气溶胶相似, 粒径一般在 $0.1 \sim 100\ \mu m$ 之间 (秦小光等, 2004), 属于米散射理论的范围, 因此, 现代沙尘气溶胶的研究理论可以用来研究第四纪末次冰期以来沙尘气溶胶的辐射效应。本文利用黄土的粒度分布信息并根据米散射理论 (章澄昌等, 1995), 对第四纪时期的沙尘气溶胶辐射效应以及气候效应进行估算分析。这种估算首先需要根据气溶胶的数浓度和复折射指数, 计算其光学和辐射特性参数, 包括消光系数、光学厚度、散射不对称因子、单次散射反照率等 (马井会等, 2007)。

要计算消光系数, 先要确定出单个气溶胶颗粒的消光效率因子 Q_c 、吸收效率因子 Q_a 、散射效

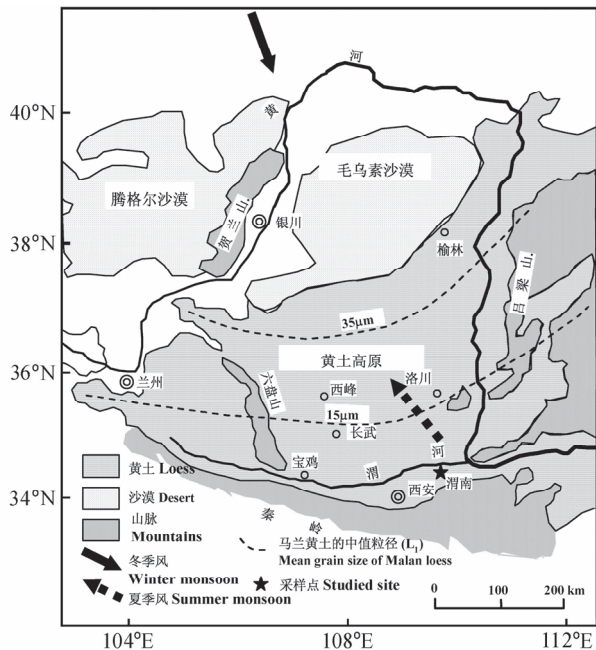


图 1 采样点位置

Fig. 1 The location of loess sampling sites

率因子 Q_s 。对于 $d > 0.3 \mu\text{m}$ 的沙尘颗粒, 米散射理论给出了比较完整的计算公式 (Hulst, 1957; 章澄昌等, 1995)。

$$\left. \begin{aligned} Q_e(x, m) &= 2 - 4 \exp(-a \tan b) \times \\ &\left[\frac{\cosh}{a} \sin(a-b) - \left(\frac{\cosh}{a} \right)^2 \cos(a-2b) \right] + 4 \left(\frac{\cosh}{a} \right)^2 \cos 2b, \\ Q_a(x, m) &= 1 + \frac{\exp(-4xm_i)}{2x_i m_i} + \frac{\exp(-4xm_i) - 1}{8x^2 m_i^2}, \\ Q_s &= Q_e - Q_a, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, 尺度参数 $x = \pi d / \lambda$; 复折射指数 $m = m_r - im_i$ ($i = \sqrt{-1}$, m_r 、 m_i 分别为 m 的实部和虚部), 气溶胶的吸收性越好, m_i 值越大, 反之越小 (Hinds, 1998); $a = 2x (m_r - 1)$, $b = \tan^{-1} [m_i / (m_r - 1)]$, 适用条件为 $(m_r - 1) \ll 1$, $m_i \ll 1$, $x \gg 1$ 。

然后进一步确定消光系数 σ_e 、吸收系数 σ_a 、散射系数 σ_s 。可根据下列公式计算 (章澄昌等, 1995):

$$\sigma_e = \sum_i N_i \pi d_i^2 Q_{e,i} / 4, \quad (2)$$

式中, N_i 为沙尘气溶胶第 i 粒级颗粒的数浓度, d_i 为第 i 粒级颗粒的直径, $Q_{e,i}$ 代表第 i 粒级颗粒的消光效率因子。因为 N_i 与第 i 粒级颗粒的体积浓度 C_i 有直接的关系, 即 $C_i = N_i \pi d_i^3 / 6$ (Hinds, 1998), 代入公式 (2), 可得

$$\sigma_e = 1.5 \sum_i C_i Q_{e,i} / d_i, \quad (3)$$

σ_a 、 σ_s 的计算方法与 σ_e 相同, 并且满足 $\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a$ (章澄昌等, 1995; Hinds, 1998)。

计算光学厚度时, 则由于沙尘气溶胶的消光作用, 太阳光经过气溶胶层之前的入射辐射通量密度为 $F_{\lambda,0}$, 之后的出射辐射通量密度为 F_λ , 根据 Beer-Bouguer 定律 (Hinds, 1998)

$$F_\lambda / F_{\lambda,0} = e^{-L \sigma_e}, \quad (4)$$

$L \sigma_e = \tau$ 被称为大气气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Thickness, 简称 AOT) (章澄昌等, 1995)。其中 L 是太阳辐射光通过气溶胶层的长度 (即光程)。

气溶胶前向散射和后向散射的不对称性用非对称因子 g 表示 (章澄昌等, 1995)。而米散射“前向峰值”效应体现在主要散射集中于前向散射的方向上。Sokolik 利用米散射理论计算了中亚大

气气溶胶散射不对称因子值在 0.7 左右 (成天涛等, 2002)。考虑到地理位置的相似性, 本文在计算过程中也取该值。

气溶胶的辐射效应强烈依赖于单次散射反照率 (Satheesh et al., 2005)。单次散射反照率 ω_0 是指总消光中散射消光的比例, 用质粒散射系数与总消光系数的比率表示 (章澄昌等, 1995):

$$\omega_0 = \sigma_s / \sigma_e. \quad (5)$$

假定入射的太阳辐射为 F_0 , 地面上空一定高度处有一个透射率为 t 、反射率为 r 的气溶胶层存在, 其中气溶胶层的透过率和反射率可分别写成 (李崇银, 1995):

$$t = e^{-\tau} + (1 - e^{-\tau}) g \omega_0, \quad r = (1 - e^{-\tau}) (1 - g) \omega_0, \quad (6)$$

由反照率为 α 的地面反射回外太空的辐射量 F_r 应为 (李崇银, 1995):

$$\begin{aligned} F_r &= r F_0 + t^2 \alpha (1 + ar + a^2 r^2 + \dots) F_0 \\ &= [r + t^2 \alpha / (1 - ar)] F_0, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $r + t^2 \alpha / (1 - ar)$ 为在气溶胶存在的情况下气溶胶—地表系统的反照率 (章澄昌等, 1995), 此处记为 R , 即

$$R = r + t^2 \alpha / (1 - ar), \quad (8)$$

根据前人对气溶胶辐射直接影响的定量估计 (章澄昌等, 1995), 可以得到气溶胶所引起的行星系统反照率变化:

$$\Delta R = R - \alpha = r + t^2 \alpha / (1 - ar) - \alpha, \quad (9)$$

$\Delta R < 0$ 表明气溶胶导致行星反射回太空的太阳辐射减少, 从而使地球升温 (李崇银, 1995); 反之, 导致地球降温 (Satheesh et al., 2005)。相应引起太阳辐射反射通量的增量为

$$\Delta F \approx F_0 T_0^2 \cos \theta [r + t^2 \alpha / (1 - ar) - \alpha], \quad (10)$$

其中, θ 是太阳天顶角, F_0 为太阳常数, T_0 为上层大气的透射率。根据章澄昌等 (1995) 的研究, 上层大气一般是指气溶胶层以上的大气层。那么对地球表面温度的影响为

$$\Delta T = -C \Delta F, \quad (11)$$

其中, C 为气候敏感度 (单位: $\text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$), 负号表示因反照率增加而导致温度的降低 (章澄昌等, 1995)。 C 值一般在 0.3~1.0 间变化, 本文采用了 Charlson et al. (1987) 的估算值 $0.77 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ (章澄昌等, 1995)。

3.2 参数选取

本文研究的对象是末次冰期 60 kaB.P 以来渭南地区沙尘气溶胶的辐射效应,但由于地质时期很多大气参数无法获取,因此必须对一些大气条件进行必要和合理的简化与假设。

(1) 波长、复折射指数:根据前人经验(章澄昌等, 1995; 齐冰等, 2006),选取波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 的可见光进行计算分析。相应沙尘的复折射指数为 $m=1.53-0.008i$ (章澄昌等, 1995)。

(2) 计算消光系数时,沙尘浓度(数浓度或体积浓度)是重要的物理量之一(王明星, 1999)。激光粒度仪给出的黄土粒度分布 c_i 是相对体积浓度,它表示单位体积的黄土样品中直径为 d_i 的颗粒的体积百分含量。在式(3)中, C_i 表示单位体积的气溶胶中直径为 d_i 的颗粒的体积浓度,两者之间有直接的关系:

$$C_i = c_i \cdot C_p, \quad (12)$$

式中 C_p 是地质时期沙尘暴大气中的沙尘体积总浓度。但 C_p 完全未知,需要用现代沙尘暴的平均粉尘浓度来近似确定 C_p 大小。

在地质时期,每一次沙尘暴沙尘浓度的不同或每年中沙尘暴发生次数的不同都可以导致黄土沉积在不同时期沉积速率的不同。如果沉积通量表示为 $D=C \cdot A \cdot S \cdot t$ (A 为面积; C 为沙尘体积浓度; S 为沉降速率,对于给定颗粒粒径的沙尘 S 是常数; t 为沉降时间),那么,对于单位面积上沙尘的沉积量,过去沙尘暴与现代沙尘暴之间有如下关系 ($D = A \cdot H = H$):

$$H_p/H = (C_p t_{sp}) / (C t_s), \quad (13)$$

式中, H 、 C 和 t_s 分别代表现代一次沙尘暴的沉积厚度、沙尘浓度和沉降时间; H_p 、 C_p 和 t_{sp} 分别表示地质时期沙尘的沉积厚度、沙尘浓度和沉降时间。对于黄土—古土壤样品,沙尘暴的沉积厚度 $H_p = dh/dt'$ (h 为样品的采样厚度, t' 为样品年龄,单位: $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$)。于是,第 i 粒级颗粒的浓度 C_i 可表示为

$$C_i = c_i \cdot C_p = c_i \cdot C \cdot (H_p/H) \cdot (t_s/t_{sp}), \quad (14)$$

由公式(13)可见 $(H_p/H) \cdot (t_s/t_{sp})$ 是沉积速率对消光特性参数的修正系数。

很明显,地质时期年沙尘暴次数和一次沙尘暴中的沙尘浓度都可以是变化的,低浓度沙尘长时间的沉积或者高浓度沙尘短时间的沉积都能产

生相同的沉积厚度。从公式(14)可以看出,对于给定的沉积厚度 (H_p),减少沙尘暴的沉积时间 (t_{sp}) 将带来浓度 C_i 的增加。公式(2)和(3)显示浓度 C_i 的增加使气溶胶的消光特性参数增大,从而增大光学厚度,最终导致气溶胶辐射效应的变化量增大。而沙尘气溶胶辐射效应造成年均温度的变化量 $\Delta T_{\text{annual}} = \Delta T \times t_{sp}/365$,因此在年尺度上,由沉积时间不同所导致的沙尘辐射效应变化可以部分抵消由于浓度差异而带来的沙尘辐射效应变化。

从现代气象研究者对沙尘天气的研究结果可知,中国北方一年中扬尘的次数在 5~40 之间波动,而北京在过去 50 年时间内平均每年发生沙尘天气约 20 次 (http://www.chinainfo.gov.cn/data/200203/1_20020326_30911.html),沙尘堆积量在 $5 \sim 29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (http://www.chinainfo.gov.cn/data/200203/1_20020326_30911.html),气溶胶浓度的变化范围是 $3.9 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (<http://www.tea.ac.cn/book/GlobalChange/2005/aerosol.pdf>)。在本文计算中,结合现代沙尘暴的沉降特点,假设 $t_s/t_{sp} = 1/20$,即地质时期每年沙尘暴发生次数为 20 次,沙尘沉降量为 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,沙尘浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (牛生杰等, 2001b; 成天涛等, 2005),代入黄土密度 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (刘东生等, 1985),可得 H 、 C 的值。最后计算得到地质时期沙尘气溶胶的体积浓度。

(3) 光学厚度根据 $\tau = L \sigma_e$ 计算,其中 $L = 1/\cos\theta$ (左浩毅等, 2007)。因为沙尘暴一般发生在春季,所以取黄土剖面采样点的时间为 4 月 15 日 07:00~18:00 (北京时间),其平均太阳天顶角 $\theta = 53^\circ$ (潘守文, 1989)。

(4) 本文估算的仅仅是由沙尘气溶胶引起的太阳辐射的反射通量变化,因此假设第四纪时期入射的太阳辐射量不变,即 $F_0 = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (潘守文, 1994),上层大气的透射率 $T_0 = 0.76$ (章澄昌等, 1995),地面反照率 $\alpha = 0.18$ (张杰等, 2005; 鲍平勇等, 2007)。

4 结果与讨论

为了查明冰期—间冰期旋回中沙尘粒度变化对气溶胶光学特性和辐射强迫的影响,首先考察

假设沙尘浓度 C_p 为常数时沙尘气溶胶消光特性的变化特点。图 2 显示了这时的消光系数、吸收系数、散射系数、光学厚度、单次散射反照率 60 ka B. P 以来的变化。

消光系数 σ_e 存在着明显的波动, 从 4 kaB. P 至今的时间段里, σ_e 逐渐降低, 而在全新世适宜期 (大约 10~4 kaB. P) 达到最大值, 冰盛期和 3 阶段时期, σ_e 明显地下降并趋于平缓。对比图 2c、2d、2e 的 3 条曲线, 散射系数和消光系数的曲线形态趋势大致相同, 并且散射在整个消光中所占的比例达 85% 左右, 这表明在第四纪时期沙尘气溶胶的光学特性中, 散射消光占主导地位。相应地, 吸收系数的曲线形态也与前两者有显著的不同, 在全新世适宜期吸收系数最大, 冰盛期最小,

而在 3 阶段时期, 其值又有明显增大。由于沙尘气溶胶是弱吸收性气溶胶, 吸收系数普遍较小, 最大值也没有达到 0.24, 所以对消光系数曲线的总体影响不大。

为了分析粒径对沙尘气溶胶光学性质的影响, 我们考察了消光系数、吸收系数、体积百分含量和效率因子的粒度分布曲线 (图 3)。对比发现在直径大约为 0.3~0.7 μm 范围内, 消光系数随直径的增大而增大, 并在 0.7 μm 附近有最大值。在 1~5 μm 之间, 消光系数出现明显波动。对比消光效率因子 Q_e 、散射效率因子 Q_s 、吸收效率因子 Q_a 随粒径的变化 (图 3d), Q_e 和 Q_s 表现为一系列逐步减小的极值波动, 当粒径增大到一定程度时, Q_e 趋于一渐进值 2, Q_s 的变化和 Q_e 基本一致, 只

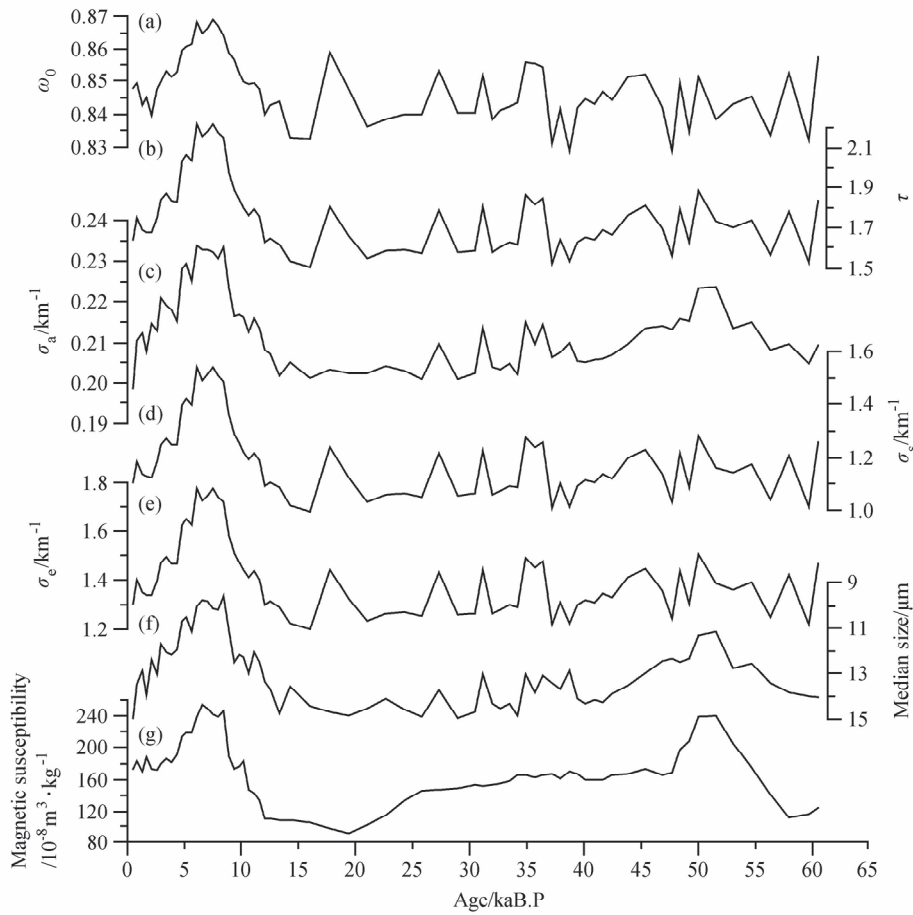


图 2 未考虑沉积速率条件下 60 kaB. P 以来沙尘气溶胶光学特性参数的变化: (a) 单次散射反照率 ω_0 ; (b) 光学厚度 τ ; (c) 吸收系数 σ_a ; (d) 散射系数 σ_s ; (e) 消光系数 σ_e ; (f) 中值粒径; (g) 磁化率

Fig. 2 Changes of optical properties of dust aerosol without stable settlement velocity over the past 60 kaB. P: (a) single scattering albedo ω_0 ; (b) aerosol optical thickness τ ; (c) absorption coefficient σ_a ; (d) scattering coefficient σ_s ; (e) extinction coefficient σ_e ; (f) median size; (g) magnetic susceptibility

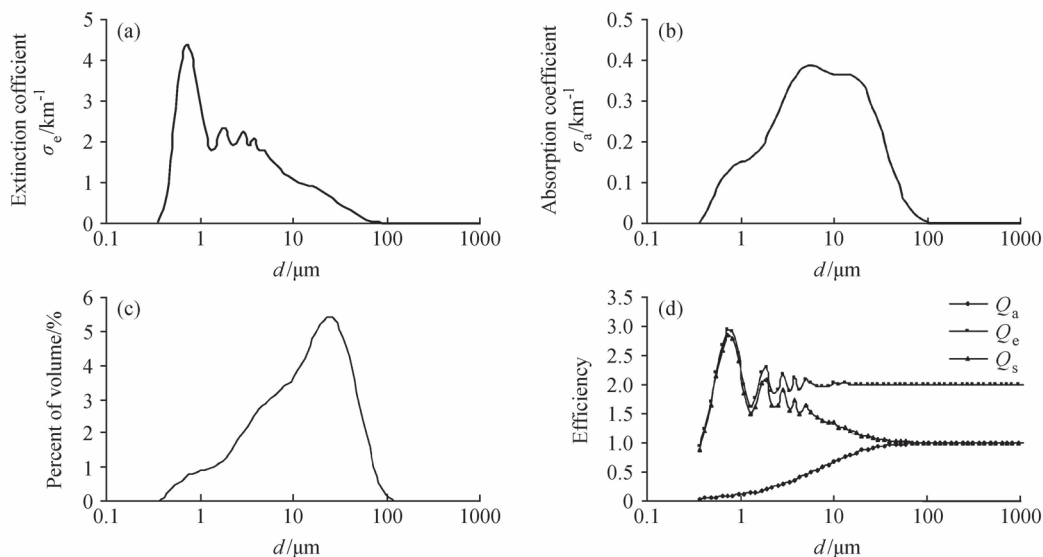


图3 典型样品的光学特性与粒度的关系: (a) 消光系数 σ_e ; (b) 吸收系数 σ_a ; (c) 粒径分布; (d) 消光效率因子 Q_e 、散射效率因子 Q_s 和吸收效率因子 Q_a

Fig. 3 Relationship between optical properties and representative grain size of loess: (a) extinction coefficient σ_e ; (b) absorption coefficient σ_a ; (c) grain size distribution; (d) extinction efficiency Q_e , scattering efficiency Q_s and absorption efficiency Q_a

是渐进值为 1。而 Q_a 则随粒径的增大而增大, 并趋于渐进值 1。消光和散射系数曲线的波动形态与消光效率因子 Q_e 基本一致, 说明消光和散射系数的大小主要受 Q_e 值控制。吸收系数也并不是像吸收效率因子一样随直径的增大而增大, 其曲线的变化形态和粒径含量曲线形态相似, 但吸收系数最大值在直径约为 $6 \mu\text{m}$ 处, 其后开始逐渐减低, 显示出细粒粉尘粒径虽小但数量众多, 从而造成较大的影响。

光学厚度 (图 2b) 与消光系数之间是线性关系, 所以曲线形态基本一致, 都存在明显的波动。光学厚度的峰值 (约 2.2) 出现在全新世适宜期, 而在整个末次冰期, 光学厚度都在 $1.4 \sim 1.8$ 之间波动, 在 3 阶段有所增加但幅度不大。

单次散射反照率 ω_0 (图 2a) 的大小主要决定于颗粒粒度, 不受黄土沉积速率的影响。 ω_0 的波动范围在 $0.83 \sim 0.87$ 之间, 与 Sokolik et al. (1993) 用地面和卫星观测资料由辐射模式反演决定的中亚大气沙尘气溶胶单次散射反照率 0.88 接近。全新世时期 ω_0 的波动更明显, 适宜期达到最大, 而冰期变化小, 并且 ω_0 值普遍较低。

消光系数、光学厚度、单次散射反照率在末次冰期一间冰期旋回中存在明显波动, 全新世适宜期达最大, 而在冰盛期其值最低, 3 阶段时期

有所增加, 但增幅不大。在全新世适宜期, 消光系数与光学厚度要高出末次冰期时约 30%, 其原因是全新世适宜期气候暖湿, 沙尘普遍较细, 而米散射理论显示, 在其粒度范围内颗粒越小, 气溶胶消光特性越明显。

当考虑沉积速率时, 即按公式 (14) 得出的体积浓度来计算沙尘气溶胶的光学特性参数 (如图 4f、4g、4h、4i 所示)。与图 2 相比, 全新世适宜期 σ_e 、 σ_s 及 τ 仍然存在最大值, 但值较不考虑沉积速率时减小 10% 左右, 分析原因是该阶段气候温暖湿润, 较低的沙尘堆积速率反映实际沙尘浓度可能较小。而在 3 阶段时期其值显著增大则显然是由于该阶段天气寒冷干燥, 沙尘暴频发, 沙尘浓度大, 使这一阶段黄土的沉积速率增大, 体现在沙尘气溶胶光学性质上是消光系数的明显增加, 并且吸收系数受沉积速率的影响最为明显, 从大约 13 kaB.P 至今呈上升趋势, 在全新世适宜期其值有不明显的波动, 最大值出现在 3 阶段时期。

此时的结果反映了黄土粒度和沙尘浓度对太阳辐射的综合影响 (如图 4b、4c、4d 所示)。沙尘气溶胶所带来的气候效应, 主要体现在由气溶胶引起的行星反照率的变化及其相应的太阳辐射反射量和温度变化上。在沙尘气溶胶的影响下,

行星反照率(图 4d)明显增加到 0.28~0.31,与没有气溶胶影响的地面反照率 0.18 相比,平均提高了约 60%,由此造成了显著的降温效应。行星反照率的最大值仍然出现在全新世适宜期,而在末次冰期时期仅存在轻微波动。由气溶胶引起的太阳辐射反射量增加(图 4c)的范围基本在 0.8~1.2 W·m⁻²,它的变化量直接决定着降温的幅度,对年均温度变化量(图 4b)的影响体现为其值在-0.8 K 附近波动,从大约 8 kaB.P 至今,降

温幅度明显减小;在 10~4 kaB.P 的全新世适宜期,太阳辐射反射量的变化和年均温度的降低幅度都达到最大值;冰盛期时期两者都减小明显,并有最小值出现;3 阶段时期,高频变化比较明显。

沙尘气溶胶的光学特性变化及所带来的温度波动与在北大西洋和阿拉伯海东北部发现的 Heinrich 降温事件(Bond et al., 1992; Schult et al., 1998) H₁~H₅之间存在很好的对应关系(如图 4

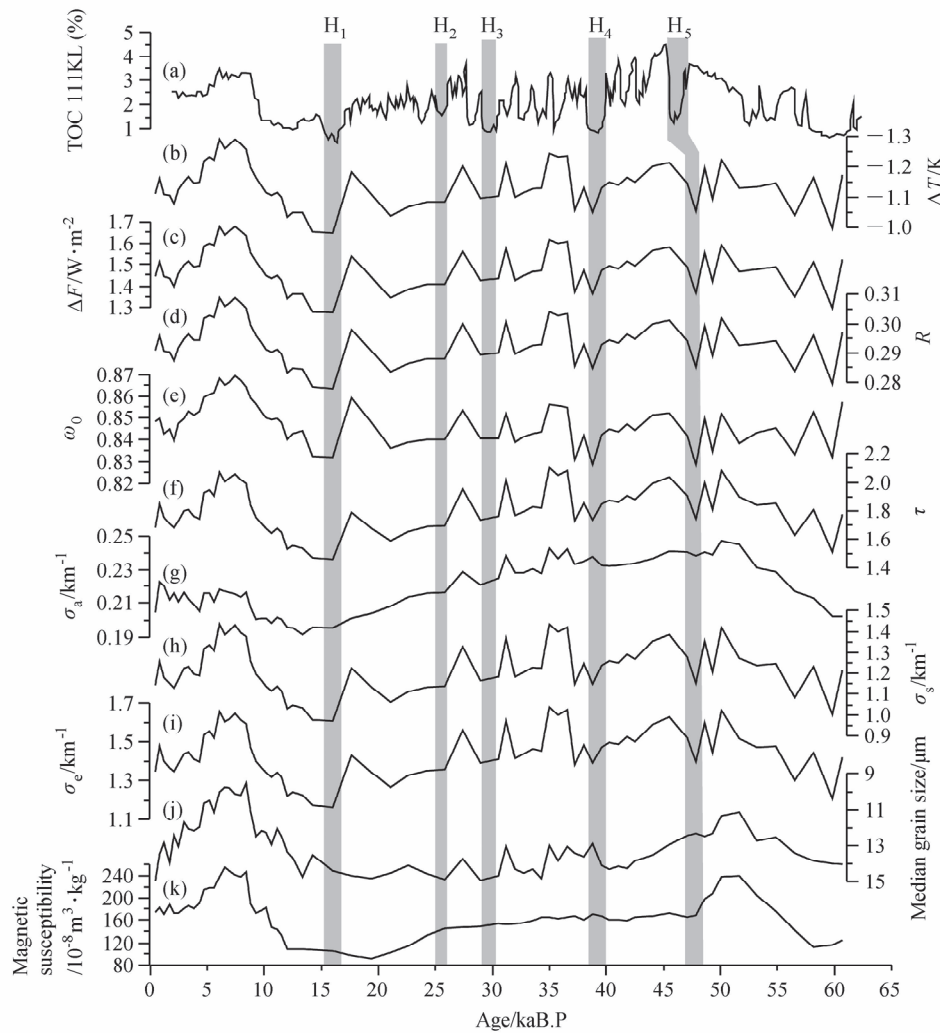


图 4 考虑沉积速率时沙尘气溶胶的光学特性变化及对太阳辐射的反射通量和温度变化量的影响:(a) 阿拉伯海东北部钻孔 TOC 含量变化;(b) 年均温度的变化量 ΔT ;(c) 太阳辐射反射增量的变化量 ΔF ;(d) 由气溶胶引起的行星反照率的变化;(e) 单次散射反照率;(f) 光学厚度;(g) 吸收系数;(h) 散射系数;(i) 消光系数;(j) 中值粒径;(k) 磁化率

Fig. 4 Fluctuations of optical properties of dust aerosols with variable settlement velocity and their effect on solar radiation and air temperature: (a) TOC-records of cores from northeastern Arabian Sea; (b) difference of annual temperature changed by dust aerosol; (c) ΔF between soalr radiations reflected by the surface-dust aerosol system and the surface; (d) difference of the earth-atmospheric system's albedo reflected by dust aerosol; (e) single scattering albedo; (f) aerosol optical thickness; (g) absorption coefficient; (h) scattering coefficient; (i) extinction coefficient; (j) median size; (k) magnetic susceptibility

所示),具体表现为:在末次冰盛期的大约 16 ka、25 ka 和 30 ka 及 3 阶段时期的 40 ka 和 48 ka,消光系数、散射系数、光学厚度、单次散射反照率及由气溶胶引起的行星反照率的变化曲线形态与阿拉伯海东北部海洋钻孔 TOC (Total Organic Carbon) 含量曲线一致,都分别出现低谷;太阳辐射反射通量与年均温度的变化量在这 5 次低谷时间上也有极小值出现,即当阿拉伯海东北部海洋钻孔 TOC 含量下降时,沙尘气溶胶对太阳辐射的影响减弱,温度的变化量降低。这一现象出现的原因是在 Heinrich 全球降温时期,冬季风加强导致风沙天气加剧,而强沙尘的沙尘颗粒也比较大,造成光学特性参数降低,最终所产生的温度变化量减小,总之,每一次降温事件发生时,气溶胶产生的辐射效应对降温事件具有抑制作用。

由上可见,在沙尘气溶胶年辐射强迫的计算中沉积速率具有重要的影响作用,而黄土地层沉积速率的准确获取与时间标尺的精度密切关联,因此时间标尺的精度对沙尘气溶胶年际尺度上气候效应的估算举足轻重。然而长期以来沉积物年龄的精确测定一直是过去全球变化研究中的一个难点问题,各种测年方法也都有其局限性,本文的时间标尺同样存在类似的问题,因此在进一步的研究中获取高精度年龄数据是准确评价沙尘年辐射效应的重要基础。

5 结论

本文根据 60 kaB.P 以来黄土粒度及沉积特征,并结合现代沙尘暴的沉降特点,总结出沙尘暴气溶胶对这一阶段影响效应的几个方面:

(1) 沙尘气溶胶产生的辐射效应主要表现在造成行星系统反照率的普遍增加。在全新世适宜期达最大值,而在冰期,其值最小。

(2) 反映在气候效应上,沙尘过程具有明显的降温效应,但主要表现为对气候的负反馈,即气候变冷,沙尘的降温幅度降低,反之,降温幅度升高。60 kaB.P 以来沙尘气溶胶给年均温度带来的影响是使其平均降幅在 -0.8 K 左右。

(3) 每一次降温事件发生时,沙尘气溶胶的辐射效应对降温过程具有抑制作用。

总之,利用黄土的粒度分布特点,并结合现

代气溶胶的研究方法,估算地质时期沙尘气溶胶的气候效应是可行的,但是需要在进一步的研究中获得高精度的年龄数据。

参考文献 (References)

- 鲍平勇,张友静,龚璐,等. 2007. 由遥感数据获取的地表反照率归一化问题探讨 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 35 (1): 67-70. Bao Pingyong, Zhang Youjing, Gong Lu, et al. 2007. Study on consistency of land surface albedo obtained from ETM and MODIS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) (in Chinese), 35 (1): 67-70.
- Bond G, Heinrich H, Broecker W, et al. 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period [J]. Nature, 360: 245-249.
- Badarinath K V, Kharol S K, Kaskaoutis D G, et al. 2007. Case study of a dust storm over Hyderabad area, India: Its impact on solar radiation using satellite data and ground measurements [J]. Science of the Total Environment, 384: 316-332.
- Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, et al. 1987. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo, and climate [J]. Nature, 326: 655-661.
- 车慧正,张小曳,石广玉,等. 2005. 沙尘和灰霾天气下毛乌素沙漠地区大气气溶胶的光学特性 [J]. 中国粉体技术, (3): 4-6.
- Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Shi Guangyu, et al. 2005. Aerosol optical characteristics in MuUs Desert under weather conditions of dust storm and haze [J]. China Powder Science and Technology (in Chinese), (3): 4-6.
- 成天涛,吕达仁,陈洪滨,等. 2005. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征 [J]. 大气科学, 29 (1): 147-153. Cheng Tiantao, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2005. The size distribution of dust aerosol particles in onqin daga sandland [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 147-153.
- 成天涛,沈志宝. 2002. 中国西北大气沙尘的辐射强迫 [J]. 高原气象, 21 (5): 473-478. Cheng Tiantao, Shen Zhibao. The radiative forcing of atmospheric dust in north-west China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (5): 473-478.
- 戴丽莉. 2007. 大气气溶胶及其研究概况 [J]. 连云港师范高等专科学校学报, (1): 88-92. Dai Lili. 2007. Atmospheric aerosol and the overview of its research [J]. Journal of Lianyungang Teachers College (in Chinese), (1): 88-92.
- Derbyshire E. 2003. Loess and the dust indicators and records of terrestrial and marine palaeoenvironment (DIRTMAP) database [J]. Quaternary Science Reviews, 22: 1813-1819.
- 高庆先,任阵海,李占青,等. 2004. 中国北方气溶胶时空分布特征及其对地表辐射的影响 [J]. 资源科学, 26 (5): 2-10. Gao Qingxian, Ren Zhenhai, Li Zhanqing, et al. 2004. Spatial and temporal distribution of dust aerosol and its impacts on radiation

- based on analysis of EP/TOMS satellite data [J]. *Resources Science* (in Chinese), 26 (5): 2–10.
- Harrison S P, Kohfeld K E, Roelandt C, et al. 2001. The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future [J]. *Earth-science Reviews*, 54: 43–80.
- Hinds W C. 1998. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* [M]. Canada: A wiley-interscience published, 349–370.
- Hulst V. 1957. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New-York: John Wiley & Sons.
- Kinne S, Pueschel R. 2001. Aerosol radiative forcing for Asian continental outflow [J]. *Atmos. Environ.*, 35: 5019–5028.
- 李崇银. 1995. 气象动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 427–428. Li Chongyin. 1995. *An Introduction to Climatic Dynamics* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 427–428.
- 李霞, 胡秀清, 崔彩霞, 等. 2005. 南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究 [J]. *中国沙漠*, 25 (4): 488–495. Li Xia, Hu Xiuqing, Cui Caixia, et al. 2005. Research on dust aerosol optical properties in south tarim basin and classification of different dusty weather in China [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 25 (4): 488–495.
- 刘东生, 等. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社. Liu Tungsheng, et al. 1985. *Loess and the Environment* [M] (in Chinese). Beijing: Science Press.
- 刘嘉麒, 陈铁梅, 聂高众, 等. 1994. 渭南黄土剖面的年龄测定及十五万年来高分辨率时间序列的建立 [J]. *第四纪研究*, (3): 193–202. Liu Jiaqi, Chen Tiemei, Nie Gaoyuan, et al. 1994. Datings and reconstruction of the high resolution time series in the Weinan loess section of the last 150 kaB.P [J]. *Quaternary Sciences* (in Chinese), (3): 193–202.
- 刘兴诗. 2007. 论沙尘暴与冰后期古气候进程的关系 [J]. *成都理工大学学报*, 1: 1–4. Liu Xingshi. 2007. On relation between sand-dust strom and ancient weather course in post-glacial [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Social Sciences)* (in Chinese), 1: 1–4.
- 罗燕, 吴润, 王卫国. 2006. 利用 MODIS-GOCART 气溶胶资料研究中国东部地区气溶胶直接辐射强迫 [J]. *热带气象学报*, 22 (6): 638–649. Luo Yan, Wu Jian, Wang Weiguo. 2006. Study of the direct radiative forcing in east China with MODIS-GOCART assimilated aerosol optical depth [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 22 (6): 638–649.
- 马井会, 张华, 郑有飞, 等. 2007. 沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 156–168. Ma Jinghui, Zhang Hua, Zheng Youfei, et al. 2007. The optical depth global distribution of dust aerosol and is possible reason analysia [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (3): 156–168.
- 牛生杰, 孙继明, 陈跃, 等. 2001a. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析 [J]. *高原气象*, 20 (1): 82–87. Niu Shengjie, Sun Jiming, Chen Yue, et al. 2001a. Observation and analysis of mass concentration of dust and sand aerosol in spring in Helanshan area [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 20 (1): 82–87.
- 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 2001b. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究 [J]. *大气科学*, 25 (2): 244–253. Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming. 2001b. Observational researches on the size distribution of sand aerosol particles in the Helan mountain area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (2): 244–253.
- 潘守文. 1989. 小气候考察的理论基础及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 54–75. Pan Shouwen. 1989. *Theoretical Basic of Local Climatic Measurement and its Applications* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 54–75.
- 潘守文. 1994. 现代气候学原理 [M]. 北京: 气象出版社, 46–50. Pan Shouwen. 1994. *The Principle of Modern Climatology* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 46–50.
- Park S U, Chang L S, Lee E H. 2005. Direct radiative forcing due to aerosol in East Asia during a Hwangsa (Asian dust) event observed on 19–23 March 2002 in Korea [J]. *Atmos. Environ.*, 39: 2593–2606.
- 秦小光, 吴金水, 蔡炳贵, 等. 2004. 全新世时期北京——张家口地区与黄土高原地区风成系统的差异 [J]. *第四纪研究*, 24 (4): 430–436. Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, Cai Binggui, et al. 2004. The difference between dust-transporting wind systems of Beijing-Zhangjiakou area and the Loess Plateau since the LGM [J]. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 24 (4): 430–436.
- Qin Xiaoguang, Cai Binggui, Liu Tungsheng, et al. 2005. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60000 before present [J]. *J. Geophys. Res.*, 29: 1–16.
- 齐冰, 杜荣光. 2006. 气溶胶粒子谱及消光系数计算 [J]. *山西气象*, (3): 25–27. Qi Bing, Du Rongguang. 2006. The calculation of the aerosol particle size distribution and extinction coefficient [J]. *Shanxi Meteorological Quarterly* (in Chinese), (3): 25–27.
- 权建农, 奚晓霞, 王鑫, 等. 2005. 兰州市 2001 年沙尘气溶胶质量浓度的特征分析 [J]. *中国沙漠*, 25 (1): 93–96. Quan Jiannong, Xi Xiaoxia, Wang Xin, et al. 2005. Analysis on aerosol concentration in Lanzhou city from sand-dust strom in 2001 [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 25 (1): 93–96.
- 申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2003. 2001 年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气 [J]. *高原气象*, 22 (2): 185–190. Shen Yanbo, Shen Zhibao, Wang Wanfu. 2003. Atmospheric aerosol optical thickness and dusty weather in northern China in spring of 2001 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 22 (2): 185–190.
- Schult H, Rad U V, Erlenkeuser H, et al. 1998. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110000 years [J]. *Nature*, 393: 54–57.

- Satheesh S K, Moorthy K K. 2005. Radiative effects of natural aerosols: A review [J]. Atmos. Environ., 39: 2089–2110.
- Sokolik I, Golitsyn G. 1993. Investigation of optical and radiative properties of atmospheric dust aerosols [J]. Atmos. Environ., 27A (16): 2509–2517.
- 王明星, 张仁健. 2001. 大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. 气候与环境研究, 6 (1): 119–124. Wang Mingxing, Zhang Renjian. 2001. Frontier of atmospheric aerosols researches [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (1): 119–124.
- 王明星. 1999. 大气化学 [M]. 北京: 气象出版社, 169–170. Wang Mingxing. 1999. Atmospheric Chemistry [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 169–170.
- 王耀庭, 王桥, 王艳娇, 等. 2005. 大气气溶胶性质及其卫星遥感反演 [J]. 环境科学研究, 18 (6): 27–33. Wang Yaoting, Wang Qiao, Wang Yanjiao, et al. 2005. Characteristics of atmospheric aerosol and retrieval of the satellite remote sensing data [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 18 (6): 27–33.
- 吴润, 蒋维楣, 王卫国, 等. 2004. 我国春季大气沙尘气溶胶的分布和短波辐射效应的数值模拟 [J]. 中国科学技术大学学报, 34 (1): 116–125. Wu Jian, Jiang Weimei, Wang Weiguo, et al. 2004. Simulation of distribution and radiative effects of dust aerosol in spring over china area [J]. Journal of University of Science and Technology of China (in Chinese), 34 (1): 116–125.
- 吴润, 符淙斌, 蒋维楣, 等. 2005. 东亚地区矿物尘气溶胶直接辐射强迫的初步模拟研究 [J]. 地球物理学报, 48 (6): 1250–1261. Wu Jian, Fu Congbin, Jiang Weimei, et al. 2005. A preliminary simulation study of direct radiative forcing of mineral dust aerosol over the east Asia region [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (6): 1250–1261.
- 姚济敏, 张文煜, 袁九毅, 等. 2006. 典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布的初步分析 [J]. 中国沙漠, 26 (1): 147–153. Yao Jimin, Zhang Wenyu, Yuan Jiuyi, et al. 2006. Aerosol optical thickness and particle size distributions in typical region [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 26 (1): 147–153.
- 章澄昌, 周文贤. 1995. 大气气溶胶教程 [M]. 北京: 气象出版社, 276–317. Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. 1995. Atmospheric Aerosol Course [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 276–317.
- 张杰, 张强, 郭锐, 等. 2005. 应用 EOS-MODIS 卫星资料反演西北干旱绿洲的地表反照率 [J]. 大气化学, 29 (4): 510–517. Zhang Jie, Zhang Qiang, Guo Ni, et al. 2005. Retrieval of the land surface albedo over arid oasis of northwest China from EOS-MODIS data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 510–517.
- 张小曳. 2007. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学进展, 22 (1): 12–15. Zhang Xiaoye. 2007. Aerosol over China and their climate effect [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (1): 12–15.
- 左浩毅, 杨经国. 2007. 基于气溶胶光学厚度反演大气气溶胶尺度分布 [J]. 物理学报, 10: 6132–6136. Zuo Haoyi, Yang Jingguo. 2007. Retrieving of aerosol size distribution based on the measurement of aerosol optical depth [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 10: 6132–6136.