

中亚粉尘东输可能对全球降温起关键性作用

刘明哲^{①②③} 魏文寿^④

(① 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ② 中国科学院研究生院, 北京 100039; ③ 中国气象局大气化学开放实验室, 北京 100081; ④ 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002. E-mail: liumz@ms.xjb.ac.cn)

摘要 冰期-间冰期旋回发生的原因一般认为可以用米兰科维奇理论来解释, 但是米兰科维奇理论也留下了一系列至今未解的难题. 对中亚粉尘的向东输送进行研究后发现, 在粉尘东输通量和全球气温降低之间可能存在一种正反馈机制, 放大了北半球高纬度太阳辐射改变的效果, 并最终导致了全球冰期的发生. 在这个正反馈机制中, 启动条件是北半球高纬大陆接收的太阳辐射量减弱, 最终结果是全球降温, 全球冰期发生, 关键性因素是中亚粉尘的东输. 使用这个正反馈机制, 可以较好解答“米兰柯维奇理论”留下的难题.

关键词 冰期-间冰期旋回 米兰科维奇理论 北半球高纬度地区 太阳辐射 中亚粉尘东输 正反馈机制

第四纪的特点之一是冰期-间冰期旋回, 对于冰期-间冰期旋回发生的原因, 一般认为可以用米兰柯维奇理论来进行解释^[1,2]. 米兰科维奇理论用北半球高纬区(65°N 以北)夏季辐射量变化的计算值, 成功地解释了第四纪冰期旋回的地质纪录, 成为上世纪古气候研究中最为辉煌的一页. 然而这项解释从开始就埋下了一系列未解的难题^[3].

根据格陵兰^[4]和南极冰芯^[5]记录的 0.1 Ma 以来 ^{18}O 含量的变化及同时段南纬 65°以南和北纬 65°以北地区太阳辐射强度变化可以看出, 北半球高纬区(65°N 以北)夏季辐射量的变化与南极和格陵兰冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的变化以及全球温度的变化相吻合, 相关性很强, 这验证了米兰柯维奇理论. 而南纬 65°以南地区的太阳辐射量变化和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的变化却没有相关关系. 但是, 根据米兰科维奇理论的计算, 引起全球冰期旋回的北半球高纬区(65°N 以北)夏季辐射量变化幅度是很小的, 波动幅度只有 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 只占总量的 10%左右, 并且北半球高纬区(65°N 以北)的面积也只占地球总面积的很小一部分, 但是问题是: 为什么北半球高纬区(65°N 以北)如此小面积地区夏季辐射量这么微小的变化能引发全球冰期-间冰期 7~10℃ 的温度波动? 为什么是北半球高纬度的太阳辐射变化引起了全球的气候变化, 而南半球的太阳辐射变化为什么对全球气候变化没有如此大的影响?

其次, 根据南极东方站的冰芯钻孔分析资料^[5], 大气中 CO_2 含量不是恒定的, 而是变化的, 并且 CO_2 含量变化曲线与全球气温变化曲线非常相似, 可以

看出两者相关性很好, CO_2 含量、全球气温和氧同位素显示出极为相似的冰期旋回波动, 但问题是, 为什么大气中 CO_2 含量的变化和全球气温变化是同步的? 为什么两者具有很好的相关性?

对于以上问题, 第四纪研究学界的科学家们做了许多工作, 但是始终没能给出一个完美的解答. 这也成了米兰柯维奇理论的一个缺陷. 其实, 以上问题可以归结为一个问题: 米兰柯维奇理论为什么能够成立? 其作用机制是什么?

1 观测与结果

1.1 对中亚气溶胶粉尘的观测与结果

从 2000 年开始, 我们在亚洲中部对中亚气溶胶粉尘进行了观测. 在塔里木盆地的阿克苏站和腾格里沙漠的沙坡头站分别设立了大气气溶胶粒子采样器, 在作为粉尘沉降区的日本东京埼玉县和光市也设立了气溶胶粒子收集器以作对比分析. 使用日本 SIBATA 公司生产的安得森型小流量气溶胶粒子粒度分级采样器(Sibata, An200)和大流量气溶胶采样器(Sibata, HV1000F)进行气溶胶样品采集, 使用聚四氟乙烯树脂滤膜对大气进行分层过滤. 观测结果如下.

由图 1 可以清楚看到阿克苏沙尘暴与非沙尘暴期间的气溶胶粒子的粒径分布, 在沙尘暴期间大气气溶胶粒子质量总浓度是非沙尘暴期间的 6 倍. 当沙尘暴发生时气溶胶粒子 3.3~11.0 μm 粒径范围平均粒子浓度是 $483.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是非沙尘暴时期同粒径范围平均粒子浓度 $67.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 7 倍. 而沙尘暴期间 0.0~3.3 μm 粒径范围气溶胶粒子浓度只是非沙尘暴

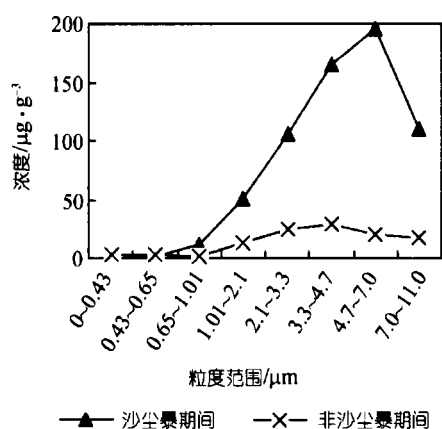


图1 阿克苏沙尘暴与非沙尘暴期间气溶胶粉尘浓度的粒径分布

期间的3.7倍。这说明沙尘暴发生时大气气溶胶粒子浓度在全部粒径范围都有增加,但粗粒粒径范围的增幅远远大于细粒粒径范围的增幅。

日本东京埼玉县采样点由于远离粉尘源地,不发生沙尘暴,只是在春季大气中有少许浮尘,因此分为浮尘期和非浮尘期。对比图1和图2,可以看出在粉尘沉降区日本,大气中的气溶胶粒子浓度远小于粉尘源区。在日本浮尘期,低层大气气溶胶中0.0~11.0 μm粒子的平均浓度是54.2 μg/m³,而在阿克苏站沙尘暴发生期间,测量到的低层大气气溶胶中0.0~11.0 μm粒径粒子的浓度达661.2 μg/m³,是日本浮尘期的12倍。这说明中亚粉尘经过长距离的沿途沉降,仍然有一部分到达了太平洋上空。并且根据遥感图像分析沙尘暴的运动轨迹,也发现中亚沙尘暴虽然起源于中亚,但其粉尘可以在西风气流的携带下到达几千公里外的太平洋。分析日本采样点浮尘

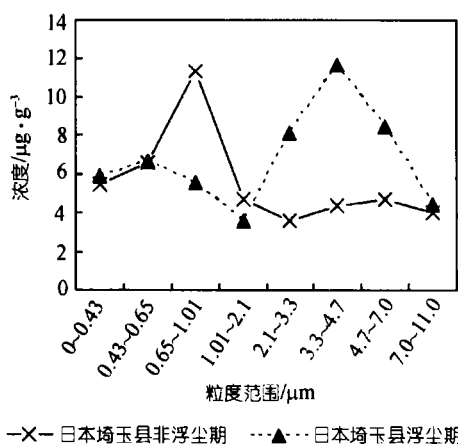


图2 日本采样点浮尘期和非浮尘期气溶胶粉尘质量浓度的粒径分布

期和非浮尘期大气气溶胶质量浓度的粒径分布,发现在浮尘期2.1~11.0 μm中粒径粒子的浓度有明显的上升,上升的峰值区位于3.3~4.7 μm粒径范围,这说明沙尘暴东输到太平洋的粉尘还是以2.1~11.0 μm的中粒径粒子为主,原因可能是由于>11.0 μm的粗粒径粒子太重,易于沉降,不容易被运送到这么远的地方,而<2.1 μm的小粒径粒子虽然易于运送,但每个个体质量小,不能形成较大重量的缘故。

我们还在日本理化研究所对所采集的气溶胶粉尘样品进行了元素Na, Mg, Al, K, Ca和Fe等的含量分析,使用的测量仪器是感应耦合等离子体原子发射分光光度计(Nippon Jarrel-Ash ICAP-575 II和Seiko SP7000A),所有样品都在高洁净度的实验环境中按规范进行,测量结果如图3。由图3可见,除了Al₂O₃,其他元素氧化物含量与粉尘源区上部陆壳的元素丰度基本一致,这说明,中亚气溶胶粉尘主要来源于上部陆壳,实际上,主要来源于当地土壤。中亚气溶胶粉尘中都含有一定量的Fe元素。阿克苏站和沙坡头站气溶胶粉尘样品中的Fe氧化物的含量基本是一致的,约占总质量的5%,换算成纯元素含量,约相当于纯Fe元素占总质量的2.2%。

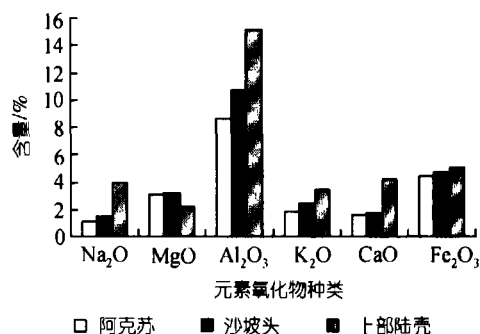


图3 阿克苏站、沙坡头站气溶胶粉尘和上部大陆壳主要元素氧化物含量对比图

1.2 对中亚沙尘暴的观测与结果

沙尘暴是中亚陆地粉尘启动并向东输送的主要动力,沙尘暴的发生频率与强度主要受大风的影响。我们统计了中亚塔里木盆地20个气象站的观测数据,发现沙尘暴发生日数与大风发生日数具有良好的相关关系(图4),达到了0.05显著性水平,这充分说明中亚沙尘暴的发生主要受大风的影响。

对中亚沙尘暴和强风的研究发现,中亚大风的发生频率与强度主要受太阳辐射的影响,当太阳辐射减弱时,会导致西风急流轴偏南,蒙古高压加强,大风增多,冬、春季气温低,降水减少,必将导致沙

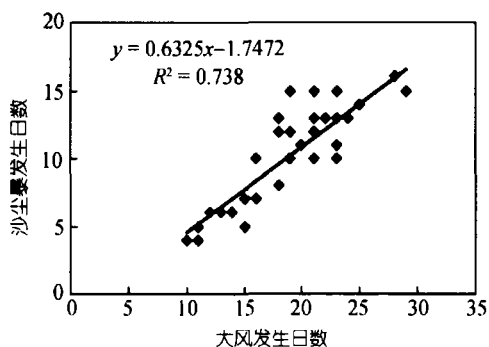


图 4 塔里木盆地沙尘暴发生日数与大风发生日数
相关关系聚点图

尘暴发生增多。安芷生等^[6]也指出,在全球气候变冷时,则西风急流轴向南移动,蒙古气旋增强,冷空气活动加强,风速增大,热带暖湿系统向南移动,中国西北西部降水减少,沙尘暴增多。我们对塔里木盆地的年大风发生日数和年平均气温进行的相关分析(图 5)也发现,两者确实存在着一定的负相关关系,并且达到了 0.05 显著性水平。当年平均气温低时,大风发生日数较多,有利于沙尘暴的发生。

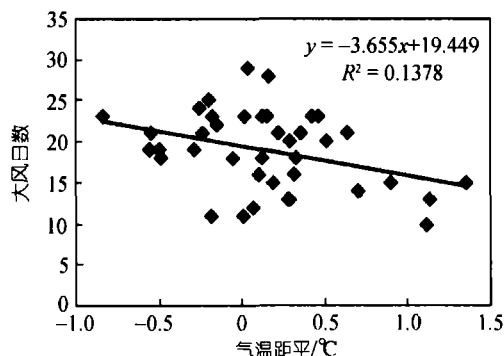


图 5 塔里木盆地大风发生日数与气温距平
相关关系聚点图

2 分析与讨论

2.1 粉尘东输

对中亚气溶胶粉尘的观测表明,当沙尘暴发生时,气溶胶粉尘浓度增加很大,是非沙尘暴时的 6 倍,这样中亚粉尘就很容易升上高空,并被强风输送到遥远的北太平洋,日本的浮尘就是这样形成的。中亚粉尘含有一定量的 Fe 元素,约占气溶胶粉尘总质量的 2.2%。对日本浮尘期的气溶胶样品分析表明,输送到太平洋上空的粉尘以 2.1~11.0 μm 中等粒径粒子为主,气溶胶粉尘浓度约为中亚粉尘源区的 1/12。

通过气团轨迹分析也可以看出,频次最高的中亚粉尘主要是由中纬高空西风气流经长距离向东输

送的中国沙漠沙尘,到达副热带高压东侧后转向南并逐渐下沉,混入东北信风后最终进入海洋边界层。在间冰期气候条件下,只有发生在亚洲粉尘源区的尘暴能将粉尘携带到海拔 5400 m 的高空,并由高空西风气流携带作半球甚至全球的输送。这就解释了为什么在北太平洋所观测到的粉尘与中国沙漠尘暴的发生频次联系紧密的现象。

对中国的黄土研究表明^[7],黄土高原是中亚粉尘东输途中沉积的产物。黄土高原的黄土沉积厚度由西北向东南减薄,黄土粒径也由西北向东南变细,且在黄土的沉积速率大致呈从东南往西北不断增大的规律,黄土沉积速率在冰期明显大于间冰期。

有关黄土物质的输送,20 世纪 80 年代前在关注西风带作用的同时,又强调了东亚冬季季风的影响。Blank^[8]在研究了西北太平洋上空的粉尘气溶胶后发现,高空西风气流是亚洲粉尘输向太平洋等地区的主要营力,且太平洋上空的粉尘大气载荷的峰值与中国尘暴发生的频次和强度相关。起源于中亚的粉尘首先在较近的黄土高原沉积,较细的颗粒则被高空西风气流输送到北太平洋。黄土高原的黄土沉积和北太平洋深海粉尘沉积具有相同的来源,即来源于中亚干旱、半干旱区。

张小曳等^[9]指出:亚洲获得的粉尘释放总量(约为 800 Tg/a)约相当于全球粉尘释放总量(约为 1500 Tg/a)的一半,表明亚洲粉尘对全球大气粉尘有重要贡献。黄土高原和中国历史降尘区的粉尘沉降量的总和约相当于中亚粉尘释放量的 20%,约有一半的中亚粉尘(400 Tg/a)被输送到遥远的北太平洋^[10]。

在冰期,尘暴将粉尘携带到高空作长距离输送,而且对区域尺度输送的粉尘的贡献也较间冰期更为显著。

南极东方站钻孔资料^[5]也表明,在冰盛期的不可溶粒子尘埃的沉积量是全新世的 9~15 倍,表明在冰期有更多的尘埃粒子从高空远途输运到南极冰盖上。

以上这些论述说明,自 6.5 MaBP 以来黄土高原开始形成,就存在着中亚粉尘的东输,中亚粉尘不仅东输到了黄土高原,而且被东输到了遥远的北太平洋,在冰期东输的粉尘通量远远大于间冰期的粉尘通量。

2.2 海水中 Fe 元素含量低是海洋生产力的限制性因素

Martin 等^[11]在 1988 年根据对东北太平洋中 Fe

元素的分布及 Fe 和其他营养元素(如 N 和 P)在海水中的含量与海水中浮游生物的生产力的关系的研究,提出了铁含量低是这一海区海洋生产力的限制因素的假设被称为铁限制假说。根据铁在某些海区大气中和溶解于海水中的气溶胶含量的计算结果,许多海域表层水中的铁可能主要来源于大气气溶胶。

庄国顺^[12]的研究也认为,海洋表层水中的铁含量低是某些海域表层水初级生产力的限制因素。海洋生物可利用的铁与海洋吸收二氧化碳的能力直接有关。最近的研究表明,海水中的可溶性铁与海洋的固氮能力亦密切相关。

许多海域的人工加铁实验证实了大气中的铁对海洋初级生产力的决定性作用。1996 年美国科学家在赤道太平洋地区^[13]进行的加铁试验和 1999 年欧美及澳大利、新西兰等国科学家一起在南大洋进行的中尺度人工加铁实验^[14]均证实,在一星期内便引起了海洋表层水生产力的数倍增长,并从人造卫星的遥感照片中直接拍摄到该地区海洋表层水硅藻大量增长的彩色照片,从而证实了铁限制假说。目前这一假说已成为全球普遍关注的理论,并成为海洋大气科学家研究的热点。

2.3 中亚粉尘的东输入海是北太平洋 Fe 元素的主要来源

对远洋中许多元素和化合物而言,大气输运是较之河流输运更为重要的途径。多个世纪以来,人们都认为河流是提供海洋中各种营养物质的最主要途径,对于近海领域这种认识也许是对的,但是由于来自河流的溶解态铁在河口会出现凝聚作用,使溶入海洋的溶解态 Fe 减少 90%,而陆源 Fe 在风系作用下,可通过大气输送到几千公里以外的大洋上空。早在 20 世纪 70 年代人们就发现大洋深海沉积物中的许多重要成分来自于大气输运,太平洋上空大气粉尘的矿物组成与太平洋深海沉积物十分相似。到了 20 世纪 80 年代初期,以 Duce^[15]为首的大气科学家开始了大洋上空气溶胶的大尺度调查研究,主要的有太平洋上空的海气交换研究项目(The Sea-air Exchange)和大西洋上空的大气海洋化学实验(the Atmosphere-ocean Chemistry Experiment, AERCCE)。通过这两个项目提供了两个大洋海域上空大气粉尘气溶胶的浓度、沉降速率及其时空分布的精确数据,人们发现海洋中许多元素,如 Pb, Al, V, Mn, Zn 和 Fe 等,大气远距离输运是比河流入海输运更为重要的途径。

对这两个海域沉积物的矿物学特性研究表明,来自大气的 Fe 元素约占海底非生物源 Fe 的 75%~90%。

从西太平洋海底收集的沉积物的组成,与长距离输运进入北太平洋的来自中国及其他亚洲地区的气溶胶粉尘的组成非常相似^[16]。所有这些数据表明,来自中亚的气溶胶粉尘是北太平洋海水中矿物质及海底沉积物的最主要来源。

2.4 粉尘东输通量增加的影响

粉尘东输通量的增加会增加海洋的生产力,导致海洋 CO₂ 气泵作用的加速,大气 CO₂ 含量降低,全球气温降低。

所谓海洋 CO₂ 气泵作用^[17],是指当海洋浮游生物剧增时会大量消耗海水中的 CO₂,海水中的 CO₂ 分压降低,这样空气中的 CO₂ 就很容易进入并溶解于表层海水中,从而平衡海水中降低了的 CO₂ 分压。而海洋生物死亡后,会沉积于海洋底部,这样大气中的 CO₂ 就会通过生物的吸收和沉积作用,转移出大气碳循环,沉积于海底。海洋 CO₂ 气泵抽取大气中的 CO₂ 并沉积于海底的速率与海洋生产力的大小成正比。

根据以上所述,中亚粉尘含有 2.2% 的 Fe 元素,中亚粉尘送入太平洋的通量增加必然导致进入海水中的 Fe 元素含量增加,而海水中 Fe 元素含量是海洋生产力的决定性因素,海水中 Fe 元素含量的增加将导致海洋生产力的增加,这将加快海洋 CO₂ 气泵的运行速率。大气中的 CO₂ 将会以更快的速率沉积于海底,原有的大气碳循环平衡将被打破,大气中的 CO₂ 含量将降低,大气的温室效应减弱,这又会导致全球气温的降低。

3 中亚粉尘东输正反馈机制

通过以上分析认为,在中亚粉尘东输通量和全球气温降低之间可能存在着一种正反馈机制。如果北半球高纬度地区太阳辐射降低,则中亚的大风和沙尘暴发生频率增加,强度加强,更多的 Fe 元素被输送到北太平洋,致使海洋生产力增加,海洋 CO₂ 气泵的运行速率加快,大气中的 CO₂ 含量降低,大气的温室效应减弱,中高纬地区乃至全球气温降低,蒙古气旋加强,沙尘暴的发生将更加频繁。这样就形成了一个粉尘东输和全球气温降低之间的一个正反馈机制,放大了北半球高纬度地区太阳辐射减弱的效果,并最终导致了全球冰期的发生。这个正反馈机制如图 6 所示。

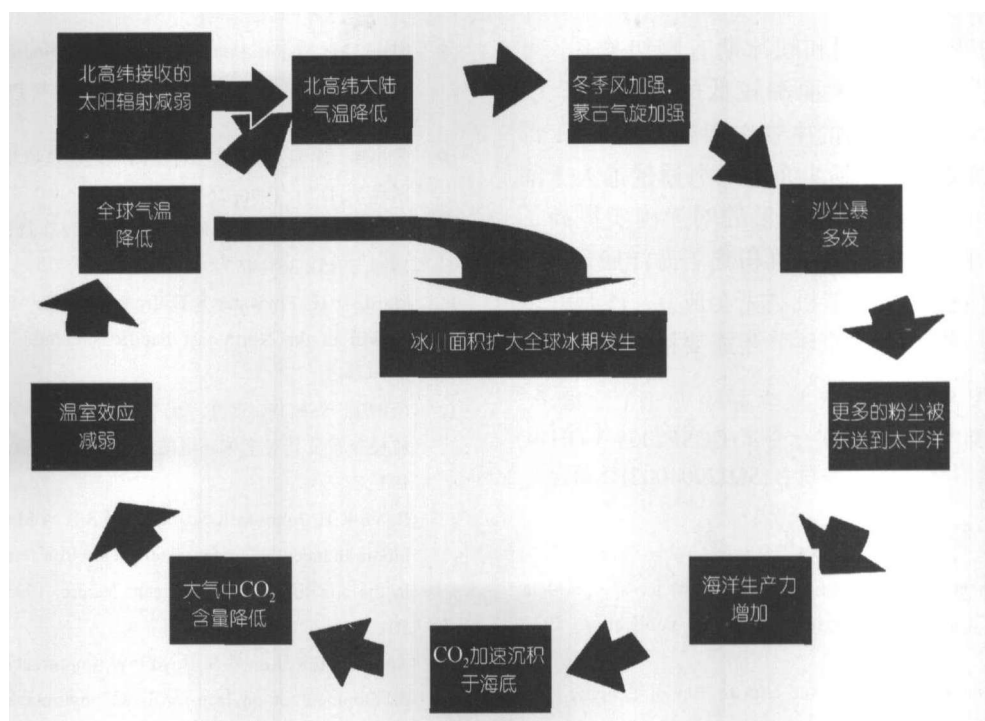


图 6 粉尘东输和全球气温降低之间正反馈机制示意图

在这个正反馈机制中,启动条件是北半球高纬大陆接收的太阳辐射减弱,最终结果是全球降温,冰期发生,中亚粉尘的东输对冰期发生前的降温起了关键性作用。

4 用中亚粉尘东输正反馈机制解答“米兰柯维奇理论”难题和初步的证据

使用这个正反馈机制,完全可以解答上文提到的“米兰柯维奇理论”难题。首先,根据“米兰柯维奇理论”,当地球轨道变化引起北半球高纬地区(65°N 以北)夏季太阳辐射量降低时,必然会导致北半球高纬大陆气温降低,蒙古气旋加强,冬季风发生频率与强度增加。这样中亚干旱与半干旱区的沙尘暴发生将增加,从而会有更多的中亚粉尘被输送并沿输送路径沉积于从黄土高原到北太平洋的广大区域,被输送并沉积进入到太平洋表面海水里的 Fe 元素当然也会增加,就会有更多的 Fe 元素溶解于海水中被海洋生物所利用。这将导致海洋生产力的增加,加快海洋 CO_2 气泵的运行速率,大气中的 CO_2 将会以更快的速率沉积于海洋底部,原有的大气碳循环平衡将被打破,从而形成了一个中亚粉尘东输和全球气温降低之间的一个正反馈机制。如果没有其他因素干扰,这个正反馈机制会一直运行下去,使得全球气温进一步降低,山地冰川和两极冰川面积扩大,雪线下降,

海平面降低。这样,北半球高纬度地区微弱的太阳辐射降低通过这个正反馈机制就会被放大以致影响到全球冰期的发生。这就解答了“为什么北半球高纬地区(65°N 以北)夏季辐射量如此微小的变化便能引发全球冰期-间冰期 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的温度波动”这一难题。

由于南半球西风带下是海洋,没有陆地,也就没有可以提供从干旱大陆向海洋输送的粉尘,因此形成不了像北半球那样的把高纬度太阳辐射减弱放大的正反馈机制,这就解答了“为什么是北半球高纬度地区的太阳辐射变化可引起全球的气候变化,而南半球的太阳辐射变化对全球气候变化没有如此大的影响”这一难题。

从中亚粉尘东输和全球气温降低之间正反馈机制示意图中可以看出,大气 CO_2 含量降低在先,是由于粉尘东输增加,导致海洋生产力增加,从而使大气 CO_2 含量降低减弱了温室效应导致了全球气温降低。大气 CO_2 含量和全球气温之间具有直接的因果关系,这就解答了为什么大气中 CO_2 含量和全球气温能够同步变化的原因。

从以上论述可以看出,使用中亚粉尘东输正反馈机制对“米兰柯维奇理论”的几个难题都能给予完美的解答。

李家英^[18]对南海北部陆坡 ODP 1144 站第四纪硅藻丰度和古气候之间的关系进行了研究,结果表明,

硅藻丰度值的变化与冰期和间冰期有密切关系,可以证实间冰期有高的海平面和较低的生物生产力,冰期有较低的海平面和高的生物生产力.结合2.1部分的分析,在冰期,中亚粉尘东输入海通量远大于间冰期,这证明中亚粉尘东输通量的增加确实提高了海洋生产力,有更多的生物量沉积到了海洋底部.

当然,要使这个正反馈机制完全成立,还有许多工作要做,有一些关键性的环节还需要被事实证实.

致谢 本工作为国家自然科学基金项目(批准号:40475041)、中国气象局气候变化专项(CCSF2005-3-DH14)和中国沙漠气象科学研究基金项目(SQJ2004002)资助.

参 考 文 献

- 1 Milankovitch M M. Canon of insolation and the ice-age problem. Washington: Koeniglich Serbische Academic Publication, 1941. 663
- 2 Berger A. Milankovitch theory and climate. *Rev of Geophy*, 1988, 26: 624—657
- 3 Daniel B K, Richard A M. A causality problem for Milankovitch. *Science*, 2000, 288(5474): 2143
- 4 Dahl J. Past temperatures directly from the Greenland Ice Sheet. *Science*, 1998, 282: 268—271
- 5 Barnola J M, Pimienta P, Raynaud D, et al. CO₂-climate relationship as deduced from the Vostok ice core: a re-examination based on new measurements and on a re-evaluation of the air dating. *Tellus*, 1991, 43B: 83—90
- 6 安芷生, 符淙斌. 全球变化科学的进展. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 671—680
- 7 曹军骥, 张小曳, 安芷生, 等. 最近 6.5~2.2 Ma 黄土高原粉尘通量变化及其指示的东亚冬季风演化和亚洲干旱化. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 97—101
- 8 Blank M. Major Asian aerolian inputs indicated mineralogy of aerosols and sediments in the western north pacific. *Nature*, 1985, 314: 84—86
- 9 张小曳, 沈宝, 张光宇. 青城高原远源西风粉尘与黄土堆积. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(2): 147—154
- 10 刘毅. 中国东部海域大气气溶胶入海通量的研究. *海洋学报*, 1999, 21(5): 38—45
- 11 Martin J H, Fitzwater S E. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the North-east Pacific subarctic. *Nature*, 1988, 321: 341—343
- 12 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 等. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响. *科学通报*, 2001, 46(3): 191—197
- 13 Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E. A Massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 1995, 383(6600): 495—501
- 14 Abraham E R, Law C S, Boyd P W. Importance of stirring: in the development of an iron-fertilized phytoplankton bloom. *Nature*, 2000, 407(6805): 727—730
- 15 Duce R A. The impact of atmosphere nitrogen, phosphorus, and iron species on marine biological productivity In: *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*. Dordrecht: D Reidel, 1986. 497—529
- 16 符某萌, 曾宪英, 温玉璞. 西太平洋气溶胶微量元素的初步研究. *气象学报*, 1990, 49(1): 54—65
- 17 Keigwin L D, Curry W B, Lehman S J, et al. The role of the deep ocean in North Atlantic climate change between 70 and 130 kyr ago. *Nature* 1994, 371: 323—326
- 18 李家英. 南海北部陆坡 ODP 1144 站位第四纪硅藻及其古环境演变. *地质论评*, 2002, 48(5): 542—551

(2005-07-20 收稿, 2006-01-16 收修改稿)