

# 中国大陆沙尘气溶胶对海洋初级生产力的影响

邓祖琴<sup>1</sup>, 韩永翔<sup>1,2\*</sup>, 白虎志<sup>1</sup>, 赵天良<sup>3</sup> (1.中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2.中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 3.加拿大环境署空气质量研究部, Toronto, Ontario M3H 5T4, 加拿大)

**摘要:** 对 2 个北太平洋站点海洋初级生产力与中国大陆沙尘进行分析。结果表明,滞后 1 个月的海洋初级生产力与中国大陆沙尘有很高的相关, 其高相关区域出现在中国北方的沙尘暴高发中心。初级生产力的峰值与大陆沙尘次数非常匹配, 表明沙尘对其生产力的大幅增加有重要的作用。在更长的时间尺度内, 大气粉尘-风成铁-海洋初级生产力的变化是一个环环相扣的完整链条, 为“铁肥料效应”提供了证据。

**关键词:** 海洋初级生产力; 沙尘气溶胶; 铁肥料效应; 中国大陆沙尘

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2008)10-0872-05

**Effect of dust aerosol production in China mainland on marine primary productivity.** DENG Zu-qin<sup>1</sup>, HAN Yong-xiang<sup>1,2\*</sup>, BAI Hu-zhi<sup>1</sup>, ZHAO Tian-liang<sup>3</sup> (1.Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction, Lanzhou Arid Meteorological Institute of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2.Institute of Tibetan Plateau Research, China Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3.Air Quality Research Branch, Meteorological Service of Canada, Toronto, Ontario M3H 5T4, Canada). *China Environmental Science*, 2008,28(10): 872~876

**Abstract:** A coefficient correlation analysis between the primary productivity in two subarctic Pacific stations and the aerosol production in China mainland was conducted. There were perfect correlation between the marine primary productivity and the dust storm frequency in the core area of the dust storms, suggesting that the dust-storm-generation aerosol was the fertilizer for marine source of iron organic matter fixation. Aerosol might have been the modulator of long-term climate variations, providing an evidence to support the iron fertilizer effect.

**Key words:** marine primary productivity; dust aerosol; iron fertilizer effect; China mainland

一般认为全球升温主要是由于温室气体, 特别是 CO<sub>2</sub> 过度排放引起的, 但实际全球气温上升的幅度却远低于科学家根据 CO<sub>2</sub> 浓度上升所预测的温度值, 所以反温室气溶胶的研究得到重视。沙尘气溶胶可以通过“铁肥料效应”降低大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度, 进而对气候变化产生重要的影响<sup>[1-3]</sup>。源于大陆的沙尘气溶胶通过远程传输和沉降到高营养低叶绿素(HNLC)的海区, 增加了海洋表层的营养物质(如 Si,N,P,Fe 等), 从而促进这些海洋区域浮游植物初级生产力的大幅度提高。由于浮游生物生产量通过储存碳和沉积碳来控制大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度, 海洋初级生产力的提高将降低大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度<sup>[1-4]</sup>, 有学者认为全球大气 CO<sub>2</sub> 变化的 1/4 来自北半球的沙尘气溶胶<sup>[5]</sup>, 因此沙尘气溶胶成为与 CO<sub>2</sub> 增温相对应的地球制冷剂, 并成为了全球物质循环及气候变化中的关键环节<sup>[6]</sup>。

位于亚洲内陆的中国北方, 是全球第二大沙尘源区, 释放的沙尘气溶胶可以远程传输到北太平洋, 并引起北太平洋海洋初级生产力的提高<sup>[7-9]</sup>。如 2001 年 4 月在北太平洋 PAPA 地区 (145°W, 50°N), Bishop 等<sup>[7]</sup>用自动碳探测器第 1 次观测到一场大陆强沙尘暴携带沙尘进入海洋, 引起温跃层有机碳和叶绿素大幅增长。韩永翔等<sup>[6,8]</sup>通过对这次沙尘暴过程期间在北太平洋的有机碳和叶绿素变化以及由大陆沙尘过程的补充证据, 从一次沙尘暴个例出发, 建立了大陆沙尘-风成铁-海洋有机碳和叶绿素变化之间的有机联系, 从机制上表明上述各环节是一个环环相扣的完

收稿日期: 2008-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40675053); 中国气象局项目(CMATG2008M27); 国家“973”项目(2005CB422000)

\* 责任作者, 研究员, han-yx66@126.com

整链条,但仍需要更长、更多的资料去验证。Jonaotaro 等<sup>[10]</sup>从 1997 年 12 月~2000 年 5 月、Hirofumi 等<sup>[11]</sup>从 1990~1999 年在约 3000m 及以下的北极太平洋中部 KNOT、SA 2 站对海洋初级生产力要素如硅藻、浮游有孔虫等分别进行了连续的观测,为在更长时间尺度内研究大陆沙尘与海洋生物效应提供了观测资料。

本研究利用 1997~2000 年、1990~1999 年同期或滞后的月沙尘暴能见度观测资料,西北太平洋 KNOT、SA 2 站约 3000m 深度观测到的硅藻、浮游有孔虫等初级生产力要素资料,探讨它们之间的关系,及其相互联系的物理机制。

## 1 研究区域特征及数据来源

研究区域包括整个中国大陆和北太平洋中部区域。中国大陆的沙尘源区主要集中在塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠、河西走廊、内蒙古中

部的苏尼特盆地或浑善达克沙地中西部、阿拉善高原,沙尘暴高发中心也出现在这些地区<sup>[12]</sup>(图 1)。当沙尘暴暴发时,沙尘源区的沙尘气溶胶被扬升到大气中,随高空大气自西向东或自西北向东南方向传输。东亚地区出现的沙尘暴主要沿着塔里木盆地—河西走廊(或内蒙古)—中国中东部—朝鲜半岛—日本—西北太平洋这一路径传输<sup>[4]</sup>。北太平洋中部具有大片高营养低叶绿素海区,Fe 是浮游生物的主要限制因素<sup>[13]</sup>。其中 KNOT(155°03'E, 43°58'N) 和 SA(174°E, 49°N) 2 站均处于这一海区(图 1)。

中国 681 个观测站沙尘能见度资料均来自中国国家气象中心归档的原始气象记录报表及其信息化产品,资料年代为 1990 年 7 月~1999 年 7 月和 1997 年 11 月~2000 年 5 月。沙尘等级分为 3 级:强沙尘暴、沙尘天气(沙尘暴+扬沙)、浮尘。

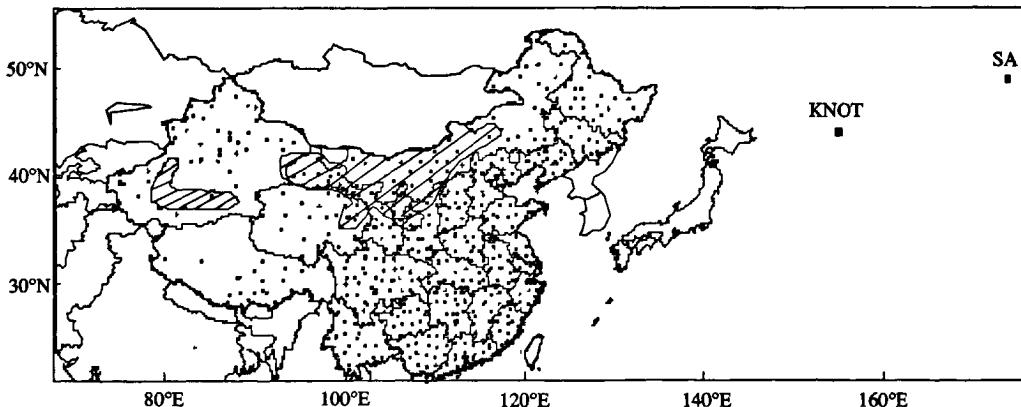


图 1 研究区域和沙尘暴中心

Fig.1 Studying regions and the centers of dust storm

KNOT 和 SA 2 站的海洋初级生产力要素资料分别来自文献[10~11]。KNOT 站的观测时间为 1997 年 12 月~2000 年 5 月,采样间隔时间为 15.03d 或 17.375d,采样深度在 2957m。选取能够代表海洋初级生产力的 2 个要素——硅藻和总物质通量进行分析。为了与月沙尘资料相匹配,将自然月中的数据进行平均,得到月均值,共 30 个月。SA 站的观测时间为 1990 年 8 月~1999 年 7 月,采样间隔时间为 20d 或 56d,共 108 个月,采样深度为 4812m。选取能够代表海洋初级生产力的浮游有孔虫通量进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 KNOT 站

硅藻是海洋中的浮游植物,是中高纬度海域的主要初级生产力之一,平均 6d 繁殖和死亡 1 次。硅藻的高生产力和大量死亡个体的迅速沉积,在生物泵中起到重要作用<sup>[10]</sup>,它与物质总通量的变化具有显著相关性(图 2)。

对硅藻通量、总通量序列和中国大陆沙尘月发生次数进行相关分析,发现同期的沙尘日数在空

间上虽有部分单点与其呈正相关,但多为散点,没有连成片(图略),假相关的可能性较大。硅藻通量、总通量与前1月的3个沙尘等级日数均呈现显著相关,而且连片出现。从相关系数空间分布区域来看,强沙尘暴的分布区域明显小于沙尘天气日数的分布区域。由图3可见,高相关区域集中在塔克拉玛干沙漠、青海三江源地区、河西走廊、内蒙古高原和华北平原。对比图1发现,除青海三江源地区、华北平原外,其高相关区域与沙尘暴高发中心几乎完全重合。而青海三江源地区是1个重要的沙尘源区<sup>[14]</sup>,华北平原也是我国重要的扬沙高发区<sup>[15]</sup>。

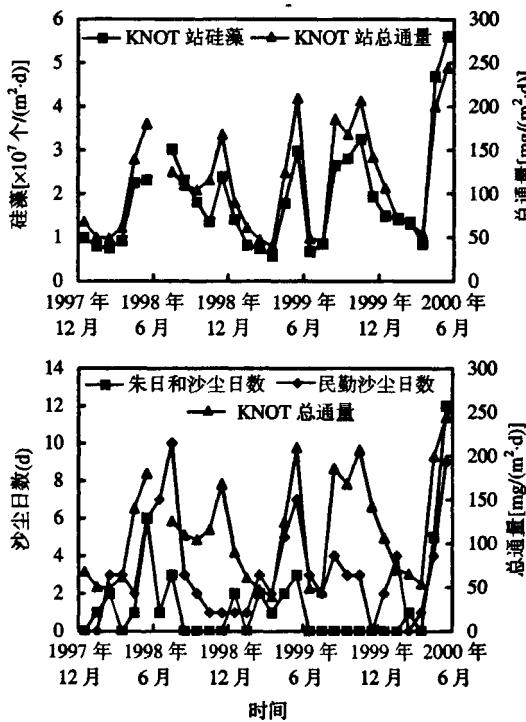


图2 KNOT 站海洋生产力<sup>[10]</sup>滞后1个月与大陆代表站沙尘日数变化

Fig.2 Changes of marine productivity with one-month lag in Station KONT and of the days of dust in representative stations

由图2可见,代表站点河西走廊民勤(103.05°E, 38.38°N)的沙尘暴高发期同初级生产力的后几个峰值有较好的匹配。但因KONT站的沙尘来源于几个不同的沙源区,如民勤站不匹配的前几个峰值却与内蒙古的朱日和站(112.54°E, 42.24°N)有非常好的匹配。

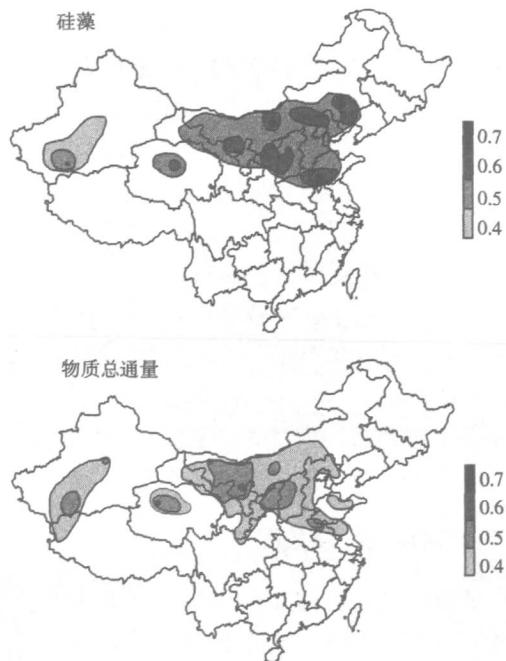


图3 KNOT 站硅藻和物质总通量滞后1个月与沙尘天气日数相关系数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of correlation coefficients between diatom fluxes, total mass fluxes in Station KNOT and the days of dust storm with one-month lag in China

阴影区通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,样本数 30,通过  
检验的相关系数为 0.36

## 2.2 SA 站

浮游有孔虫属于海洋中的浮游动物,以浮游植物为食物,浮游植物的产量决定着植食性浮游动物的产量,因此,浮游有孔虫通量也经常被作为海洋初级生产力的重要指标。

浮游有孔虫通量与中国大陆沙尘月发生次数的空间相关分布表明,强沙尘暴的分布区域明显小于沙尘天气日数的分布区域,同KONT站的基本相似(图4),最大的区别在于其分布范围较KONT站有所缩小。但通过95%显著检验的阴影区所显示的高相关区域仍集中在中国北方的沙源区。它的样本数量达到108个,是KONT站样本数量的3倍多。这表明,在更长的时间尺度内,大陆沙尘与海洋初级生产力仍具有显著相关性。同样,其代表站点如塔里木盆地和田(79.56°E, 37.08°N)的沙暴高发期同初级生产力的几个峰值有较好的匹配(图5)。

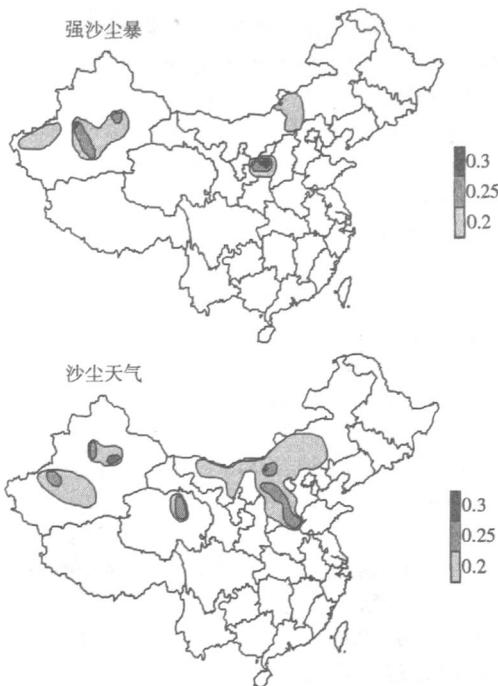


图 4 SA 站浮游有孔虫通量<sup>[11]</sup>滞后 1 个月与强沙尘暴、沙尘天气日数相关系数的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of correlation coefficients between planktonic foraminifer fluxes in Station SA and the days of strong dust storms and sandstorms with one-month lag in China  
阴影区通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,样本数 108,通过检验的系数为 0.19

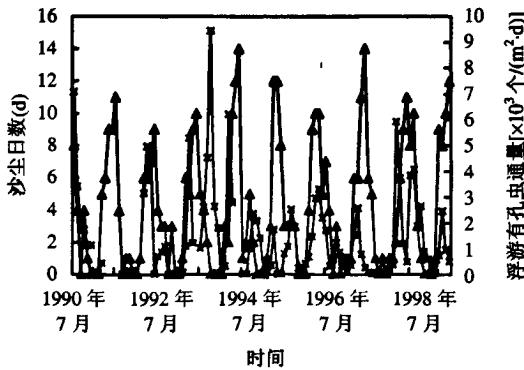


图 5 SA 站浮游有孔虫通量滞后 1 个月与大陆代表站和田沙尘日数变化

Fig.5 Changes of planktonic foraminifer fluxes with one-month lag in Station SA and of the days of dust in Hetian  
—▲— 沙尘日数 —×— SA 浮游有孔虫通量

### 3 讨论

北太平洋地区是具有大片高营养低叶绿素(HNLC)的海区,Fe 是浮游生物的主要限制因素<sup>[13]</sup>.在北太平洋地区浮游生物所需要的 Fe 估计是  $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其中上涌流能够带来  $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其余的 Fe 则由来自中亚大陆的粉尘提供<sup>[7]</sup>.通过对 2001 年沙尘暴期间在北太平洋的沉降量的估算,一次强沙尘过程可给 PAPA 地区总共带去  $88.2\sim165\mu\text{g}/\text{m}^3$  的沙尘<sup>[6]</sup>.而 KNOT、SA 2 站不但处在中亚沙尘的远程传输的主路径上<sup>[8]</sup>,而且在 PAPA 地区上游数千 km.根据沙尘气溶胶的沉降规律,KNOT、SA 2 站应较 PAPA 地区具有更高的沙尘沉降量.沙尘气溶胶从中亚大陆远程传输到北太平洋大约需要  $7\sim10\text{d}$ <sup>[6,16-17]</sup>,经中途沉降和在大气中扩散,到达北太平洋上空时,沙尘浓度已经大幅度降低,而且沙尘粒子的半径一般已经  $<10\mu\text{m}$ ,以  $2\sim4\mu\text{m}$  粒子为主<sup>[4]</sup>.而这种细沙尘粒子从海洋表面沉降到海洋深度  $3000\text{m}$  处大约需要  $20\text{d}$ <sup>[17]</sup>.海洋初级生产力的影响要素很多,例如海水温度和太阳辐射等因素对海洋初级生产力均有重要的作用<sup>[10-11]</sup>,但 Fe 是该区浮游生物的主要限制因素<sup>[1]</sup>,而 95% 的 Fe 又来自大陆沙尘<sup>[13]</sup>.如果大气粉尘-风成铁-海洋初级生产力的变化是一个环环相扣的完整链条,那么,应该在海洋初级生产力上有所反映.中国大陆沙尘发生次数与滞后 1 个月的海洋初级生产力显著相关,且其峰值与大陆沙尘次数非常匹配,表明沙尘对其生产力的大幅增加有重要的作用.这些事实,从更长的时间尺度为“铁肥料效应”提供了证据.

### 4 结语

滞后 1 个月的海洋初级生产力与中国大陆沙尘有很高的相关,其高相关区域出现在中国北方的沙尘暴高发中心.初级生产力的峰值与大陆沙尘次数非常匹配,表明沙尘对其生产力的大幅增加有重要的作用;同时在更长的时间尺度内,大气粉尘-风成铁-海洋初级生产力的变化是一个环环相扣的完整链条,为“铁肥料效应”提供了证据.

## 参考文献:

- [1] Martin J H. Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: The iron hypothesis [J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1-13.
- [2] Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, et al. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1996, 383(6600): 495-501.
- [3] Watson A J, Bakker D C E, Ridgwell A J, et al. Effect of iron supply on Southern Ocean CO<sub>2</sub> uptake and implications for glacial atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Nature*, 2000, 407(6805): 730-733.
- [4] Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability [J]. *Science*, 1980, 209 (4464): 1522-1524.
- [5] 吴枫,曹军骥,安芷生,等.最近 25 万年亚洲粉尘与北太平洋古生产力和大气 CO<sub>2</sub> 变化的联系 [J]. *过程工程学报*, 2006, 6(增2): 75-80.
- [6] 韩永翔,奚晓霞,方小敏,等.亚洲大陆沙尘过程与北太平洋地区生物环境效应:以 2001 年 4 月中旬中亚特大沙尘暴为例 [J]. *科学通报*, 2005, 50(23): 2649-2655.
- [7] Bishop J K B, Davis R E, Sherman J T. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific [J]. *Science*, 2002, 298(5594): 817-821.
- [8] 韩永翔,宋连春,赵天良,等.北太平洋地区沙尘沉降与海洋生物兴衰的关系 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 157-160.
- [9] Jaffe D, Snow J, Cooper O. The 2001 Asian dust events: transport and impact on surface aerosol concentrations in the U.S. [J]. *EOS*, 2003, 84(46): 501-516.
- [10] Jonaotaro Onodera, Kozo Takahashi, Makio C Honda. Pelagic and coastal diatom fluxes and the environmental changes in the northwestern North Pacific during December 1997-May 2000 [J]. *Deep-Sea Research II*, 2005, 52: 2218-2239.
- [11] Hirofumi Asahi, Kozo Takahashi. A 9-year time-series of planktonic foraminifer fluxes and environmental change in the Bering sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990-1999 [J]. *Progress in Oceanography*, 2007, 72(4): 343-363.
- [12] Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, et al. Modeled size-segregated wet and dry deposition budgets of soil dust aerosol during ACE-Asia, 2001: Implications for trans-Pacific transport [J]. *Geophys. Res.*, 2003, 108(D23): 8665-8674.
- [13] Rea D K, Hovan S A. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(2): 251-258.
- [14] 方小敏,韩永翔,马金辉,等.青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积:以 2003-3-4 拉萨沙尘天气过程为例 [J]. *科学通报*, 2004, 49(11): 1084-1090.
- [15] 周自江,王锡稳,牛若芸.近 47 年中国沙尘暴气候特征研究 [J]. *应用气象学报*, 2002, 13(2): 193-200.
- [16] 韩永翔,赵天良,宋连春,等.北太平洋地区春季粉尘的空间分布特征——观测及模拟研究 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(3): 257-261.
- [17] 袁薇,王式功,张劲,等.中国沙尘天气与海洋环境关系及兰州雨水成分的初步分析 [J]. *高原气象*, 2006, 25(增): 128-135.

**作者简介:** 邓祖琴(1981-),女,重庆开县人,助理工程师,硕士,主要从事沙尘气溶胶和大气成分方面的研究,发表论文 1 篇。

### John Allan 获 2008 年斯德哥尔摩水奖

有环境科学领域的诺贝尔奖之称的斯德哥尔摩水奖今年被授予伦敦大学的 John Anshony Allan.他获奖是因为引入了实际水(Virtual water)的概念,从而提供了 1 个方法,可以计算生产任何一种物品所需的水量。

人们在许多情况下都要使用水.斯德哥尔摩国际水研究所(SIWI)在 2008 年 3 月 19 日颁奖时说:“为了一杯咖啡总共使用了 140L 水用于咖啡豆的生长、生产、包装和运输.”这相当于 1 个英国人平均每天饮水和用水的需求.而生产 1 个汉堡包需要约 2400L 水。

自从 Allan 在 1993 年引入实际水的概念后对相关政策和贸易产生了重大影响.政策制订者和水管理人员现在用实际水讨论水资源问题,计算实际水有助于缺水地区了解其总的水的进口和出口.Allan 在调查中东地区水紧缺情况时提出了通过食品作为替代水资源的实际输入水概念。

Allan 还提出“问题区域”描述围绕水问题的政治和经济场景.他认为交界地区有潜在的和实际的冲突,如尼罗河谷地,水资源由沿河各国共享。

斯德哥尔摩水奖每年颁奖 1 次,旨在表彰在与水有关的活动中对教育、科研、管理和人道主义援助有突出贡献的个人或组织。

江年 摘自《Environmental Science & Technology》May 15,3487(2008)