FACE实验技术和方法回顾及其在全球变化研究中的应用

冯兆忠^{1*} 徐彦森² 尚 博¹

¹南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; ²中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘 要 化石燃料的燃烧和城市化进程的加快导致大气中二氧化碳(CO₂)和臭氧(O₃)浓度日益升高, 大气气体浓度的变化会对植物个体和陆地生态系统结构与功能产生影响。CO₂浓度升高增加了陆地生态系统碳汇能力, 而O₃导致作物减产和生态系统固碳损失。自由空气中气体浓度增加(FACE)系统是最接近自然的一种模拟大气气体浓度增加对生态系统影响的研究平台, 已广泛应用于各种生态系统, 为理解陆地生态系统生态过程对全球变化的响应及评估未来情景的生态风险提供了重要科学依据。该文从FACE技术特点出发, 介绍了国内外建成的大型CO₂/O₃-FACE系统, 分析了FACE系统的不同布气方式在不同生态系统研究过程中的优点与缺点, 概述了全球FACE运行的现状和取得的主要成果, 并指出了FACE系统存在的主要问题和前沿研究方向。

关键词 自由空气中气体浓度增加(FACE); 二氧化碳; 臭氧; 陆地生态系统; 农田生态系统

冯兆忠, 徐彦森, 尚博 (2020). FACE实验技术和方法回顾及其在全球变化研究中的应用. 植物生态学报, 44, 340–349. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0223

Free-Air Concentration Enrichment (FACE) techniques, experimental approach and its application in the field of global change ecology: a review

FENG Zhao-Zhong^{1*}, XU Yan-Sen², and SHANG Bo¹

¹School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; and ²State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract

Massive fossil fuel burning and the rapid urbanization have caused significant increases in atmospheric carbon dioxide (CO₂) and ozone (O₃) concentrations. The increased gas concentration has significant impacts on the structure and function of terrestrial plants and ecosystems. Rising CO₂ concentration increased the plant growth and productivity, while elevated O₃ decreased grain yield and carbon sequestration capacity. The Free-Air Concentration Enrichment (FACE) is one kind of facility closest to the natural conditions for simulating effects of rising atmospheric gas concentration on ecosystems. FACE has been widely used in various ecosystems and provides key basis to understand the ecological progress in response to global change and parameters for risk assessment in terrestrial ecosystem models. In this paper, CO₂/O₃-FACE facility around world and their technology are reviewed. The advantages and disadvantages of the design of each FACE in different terrestrial ecosystems were discussed. The current status of global FACE facility and progress in research achievements are also introduced. Furthermore, the problems in running current FACE and the frontiers of scientific questions are also highlighted.

Key words Free-Air Concentration Enrichment (FACE); carbon dioxide (CO₂); ozone (O₃); terrestrial ecosystem; agricultural ecosystem

Feng ZZ, Xu YS, Shang B (2020). Free-Air Concentration Enrichment (FACE) techniques, experimental approach and its application in the field of global change ecology: a review. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 340–349. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0223

工业革命以来化石燃料的使用导致了大气中二氧化碳(CO₂)浓度不断升高, 大气中的CO₂浓度从工业革命前的280 μmol·mol⁻¹升高至425 μmol·mol⁻¹ (IPCC, 2017), 预计到21世纪30年代大气中CO₂浓度

收稿日期Received: 2019-08-21 接受日期Accepted: 2019-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(41771034)和中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC019)。Supported by National Natural Science Foundation of China (41771034), and the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (QYZDB-SSW-DQC019).

* E-mail: zhaozhong.feng@nuist.edu.cn

将会升高到 $550 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 左右(IPCC, 2013), 并在未来仍将持续升高。 CO_2 作为一种温室气体, 持续升高加速全球变暖导致海平面上升威胁人类生存, 影响了陆地生态系统的结构与功能。同时随着人类活动的加剧, 臭氧(O_3)的前体物氮氧化物和挥发性有机污染物浓度居高不下, 导致了近地层 O_3 已成为很多国家和地区夏季的首要污染物, 并以每年 $1\text{--}3 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的趋势逐步升高(Cooper *et al.*, 2014)。 CO_2 是植物光合作用的底物, 其浓度升高对陆地生态系统固碳具有正向作用(Nowak *et al.*, 2004), 而 O_3 通过植物气孔进入叶片后, 因其强氧化性产生了大量的活性氧自由基, 引起光合速率降低, 进而造成了作物减产和森林植被固碳减少(Ainsworth *et al.*, 2012)。因此人类活动引起的大气组分的改变将影响陆地生态系统中碳、氮和水循环的生态过程, 进而影响生态系统功能(Vingarzan, 2004; Ainsworth & Long, 2005)。为了预测大气中 CO_2/O_3 浓度升高对陆地生态系统的影响, 近30年来, 已在全球范围内不同生态系统开展了大量的野外条件下的控制实验。

在全球变化生态学研究, 开顶式气室(OTC)和大型自由空气中气体浓度增加(FACE)系统是在野外条件下模拟 CO_2/O_3 浓度升高对陆地生态系统影响的两种典型的研究手段。在初期的全球变化研究中OTC被广泛地应用, 主要模拟 CO_2/O_3 浓度升高对植物个体的影响, 为模型提供了关键生理参数并提供了验证数据集。由于OTC是由半封闭的塑料薄膜或高透光玻璃建造, 因此改变了气室内部的微气象条件, 包括气温、相对湿度、光合有效辐射和气体扰动等(Nussbaum & Fuhrer, 2000; Piikki *et al.*, 2008; Ainsworth *et al.*, 2012)。植物对温度和相对湿度等环境条件的变化反应敏感, 例如: 饱和水汽压亏缺的升高导致气孔关闭并抑制了植物光合作用(Damour *et al.*, 2010), 因此导致了气体浓度升高的影响被低估。不同研究结果均指出基于OTC的研究结果不能真实地代表未来生态系统对 CO_2/O_3 浓度升高的响应(Whitehead *et al.*, 1995; Feng *et al.*, 2018)。随后在无封闭条件下模拟气体浓度升高的实验平台应运而生。FACE系统是在空气自由流动的野外环境下特定升高了大气中某一气体组分浓度。除了布气管道遮挡外没有其他的隔离遮挡物, FACE研究区域内温度、湿度、光照和风速等条件与自然生

态环境十分接近, 提供了全球变化对陆地生态系统影响的真实模拟平台(Hendrey *et al.*, 1999)。FACE实验目前主要研究了 CO_2 和 O_3 浓度升高对森林、草地和农田生态系统的影响。经过近几十年来的发展, 在全球范围内大量的FACE实验经历了起步和高速发展阶段, 但受制于系统设计寿命和实验经费等多重因素的限制, 目前全球FACE实验逐步停止运行。但是在 CO_2 和 O_3 浓度不断升高的背景下, 如何保障粮食安全和陆地生态系统对气候变化的响应还存在研究的不足, FACE实验能够较为真实地模拟全球变化对陆地生态系统的影响, 减少 CO_2 和 O_3 浓度升高影响粮食产量和碳动态变化预测的不确定性。

本文系统回顾FACE系统在全球变化研究中的应用, 综述目前已经取得的重要进展, 并提出全球变化研究过程中存在的主要问题, 展望未来FACE研究中值得重点关注的内容。

1 FACE实验的基本原理和装置分类

1.1 FACE的基本原理

全球变化研究中首先利用温室或OTC模拟 CO_2/O_3 浓度升高, 研究对象往往为盆栽幼苗, 盆栽实验对植物根系生长带来的限制影响了实验结果(Körner, 2003)。FACE实验建立在野外条件下, 将高浓度的 CO_2/O_3 通过管道释放到植物冠层, 用于模拟未来大气中 CO_2/O_3 浓度升高对研究对象的影响。FACE系统可以用来探究气体浓度升高对粮食作物产量与品质, 陆地生态系统碳动态、水循环过程, 生态系统养分的迁移转化和土壤微生物的影响(Norby & Zak, 2011), 在全球变化的研究中发挥着关键作用。利用全球已有的OTC和FACE数据进行meta分析, 研究结果表明 O_3 对作物产量损失的评估在OTC和FACE中存在显著差异(Feng *et al.*, 2018), 同时OTC的结果高估了 CO_2 浓度升高对作物产量的影响(Long *et al.*, 2005)。因此利用开放式的FACE系统重新评估 CO_2/O_3 对植物的影响是至关重要的。

FACE系统最大的优势是能够在完全开放的环境下模拟生态系统(地上和地下部分)对 CO_2 和 O_3 浓度升高的反应。全球变化对生态系统地下过程的影响是目前研究的热点。FACE系统因实验空间大, 实验的植物都是直接种植于大田中, 能连续实验多年(目前最长实验年数达到了15年), 因此是研究地下生态过程的极佳平台。因幼苗和成年植物对全球变

化存在不同的响应过程, OTC箱内尺寸的限制不适合研究气体浓度升高对速生木本植物的连续多年影响。大量FACE系统在升高CO₂/O₃浓度的基础上实现了与氮沉降或干旱等复合因子实验(Nowak *et al.*, 2004)。一些FACE系统利用不同碳丰度的CO₂实现长期标记, 为生态系统的研究提供了新的研究手段和方法(Leavitt *et al.*, 1995)。

1.1.1 FACE实验原理

大气中的CO₂和O₃浓度约为400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和70 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 两种气体浓度相差巨大。在FACE设计过程中采用了两种不同的气体制备和传输方案。因此在FACE系统的设计过程中需要根据增加的气体、设定目标浓度和实验样地选择好合适的设计方案。在CO₂-FACE中主要采用大型液态CO₂存储容器和汽化装置, 将汽化后的CO₂直接传输到样地内释放到植物冠层。而在O₃-FACE中因为O₃容易分解不易存储, 因此通过高压电离纯氧气产生。需要注意的是工业用臭氧发生器一般配备有空气源制氧机, 通过空气源制备的氧气中含有一定量的氮气, 在电离过程中产生的氮氧化物对植物存在一定的影响。纯氧中杂质较低, 能够有效控制实验过程中的影响变量。不同于CO₂, 高浓度O₃是强氧化剂, 直接喷射在叶片表面会产生急性O₃伤害, 因此O₃浓度的控制需要更为精准, 避免浓度波动过大。为了高浓度的O₃能远距离传输到样地内, 并且从管道释放出来的高浓度O₃能快速扩散到大气中, 需要使用大功率空气压缩机压缩清洁干燥空气稀释发生器产生的O₃。

因此在FACE系统研制的过程中需要使用在其他领域常见的工业化设备。在硬件建设方面主要涉及气动控制和气体传输等方面的内容, 需要将应用于工业中的气动控制设备应用到FACE建设中来。同时这种开放式的环境减少了人工设施对植物生境的干扰, 但这也增加了FACE的控制难度。为了达到设定的目标浓度, 在运行FACE的过程中需要消耗大量的资源, 大型设备的定期维护也增加了FACE的运行成本。

1.1.2 FACE控制技术原理

在CO₂/O₃-FACE系统的研发过程中, 基于算法进行浓度控制是整个系统的核心。目前全球绝大多数的FACE系统实现了自动化控制。通过同时监测对照样地和控制样地的气体浓度, 结合环境要素, 利用快速反馈的比例-积分-微分控制器(PID)方程调控

流量计达到实时控制气体浓度, 避免了气体浓度过度波动, 实现稳定调控(韩勇等, 2002)。利用数据采集系统将样地的气体浓度、风速风向和温湿度等信息采集存储到中控室, 实现测量-控制-存储的一体化。在很多平台中还能将FACE数据传输到服务器中, 研究人员只要通过网站输入自己的用户名和密码即可实现数据共享和分级管理。在过去, FACE系统的数据控制系统主要利用Campbell公司的数据采集器实现数据采集和自动化控制, 但是随着物联网技术的快速发展, 可将工业设备应用于科研领域, 不仅降低建设成本还可以保障系统稳定性, 为后续的维护保养提供方便。

1.2 FACE系统分类

FACE实验在不同生态系统中广泛应用, 在森林、草地和农田等不同生态系统中, 研究对象高度、占地面积不同, 关注的主要问题也不尽相同, 在样地内如何将气体均匀地释放到冠层是FACE系统设计中的难点, 因此FACE实验根据研究对象的特点形成了以下3种最为主要的气体释放方式。

1.2.1 冠层顶部布气

在冠层上方布设气体自由沉降的方式主要应用于作物和草地生态系统的研究中。如图1所示, FACE样地以圆形和正八边形为主, 样地直径至少要8 m以上, 在样地内部设置了一定的缓冲区域避免了边缘效应的产生(刘钢等, 2002)。以中国科学院南京土壤研究所的完全开放式CO₂/O₃-FACE为例, 单个FACE样地为直径14 m的正八边形, 沿边界向内1 m宽度作为缓冲区域, 有效面积约为120 m²。布气管道环绕在样地周围, 通过样地中心的风向传感器确定风向同时开启位于上风方向的布气管道。通过自然风将气体传输到FACE样地内, 在传输的过程中高浓度的CO₂/O₃在空气中自由扩散稀释, 避免高浓度气体直接接触叶片产生影响。这种布气方式目前主要应用于美国伊利诺伊大学香槟分校的大豆(*Glycine max*)、玉米(*Zea mays*) CO₂/O₃-FACE, 中国江苏江都的稻麦轮作CO₂/O₃-FACE (刘钢等, 2002)以及美国内华达荒漠草原CO₂-FACE (Hendrey *et al.*, 1993)。这种布设方式通过增加冠层气体浓度然后自由沉降的方法符合自然条件下气体浓度廓线分布规律, 通过自然风传输进行气体混合, 可有效避免气体浪涌。这种布气方式主要缺点是在低风和大风条件下气体浓度不容易控制, 尤其在无风条件下气体

不能有效扩散。一些FACE系统为了避免气体浓度分布不均,在无风条件下会停止放气。在大风天气时释放的气体被风快速带走,不仅消耗大量的气体也不能达到设定的浓度。

1.2.2 样地周围垂直布气

垂直布气主要应用于森林生态系统中,如美国Duke森林(Hendrey *et al.*, 1999),橡树岭国家实验室和Aspen-FACE系统。由于树木个体较大,为了增加单个FACE样地内植物个体的数量,单个样地的直径约为25 m,同时森林冠层高度不均。如果采用冠层上方布气的方式,风扩散能力不足以将释放的气体传输到样地的对边,但垂直布气可有效地解决该问题(图2)。以Duke森林FACE为例,样地直径为30 m,在样地周围布设了16根高12 m的管道,在管

图1 冠层顶部放气图。图片来源于<https://soyface.illinois.edu/gallery>。

Fig. 1 Schematic diagram of venting theory at the top of canopy. Photo by <https://soyface.illinois.edu/gallery>.

图2 样地周围垂直放气图。图片来源于<https://www.westernsydney.edu.au/hie/EucFACE>。

Fig. 2 Schematic diagram of vertical deflation around the field. Photo of the EucFACE facility courtesy of the Hawkesbury institute of the environment (<https://www.westernsydney.edu.au/hie/EucFACE>). EucFACE is funded by Western Sydney University in conjunction with the commonwealth of Australia.

道上每间隔3 m开了3个间隔60°的圆孔,混合方式的CO₂气体从圆孔中喷射进入样地内部,实现样地内CO₂浓度的增加(Hendrey *et al.*, 1999)。这种布气方式主要应用于大型的森林FACE系统。

1.2.3 样地内垂直布气

为了更加减少气体的损失,将布气管道从顶部均匀地垂到整个冠层中间(Grams *et al.*, 2011)。使用这种方式在全球范围内建设了许多小型FACE系统,大量节约了研究经费。日本和意大利利用此布气方式,分别建立了森林树木的O₃-FACE系统(Watanabe *et al.*, 2013; Paoletti *et al.*, 2017),他们利用内径4 mm的特氟龙管,将高浓度O₃布设到整个样地内部,均匀增加整个样地内的O₃浓度,这种方法也被应用于德国的isoFACE系统,将低碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)的CO₂气体均匀释放到冠层内部(Grams *et al.*, 2011)。这种布气方式不用考虑冠层和风速的影响,显著提高了浓度分布的均匀性。但是在增加O₃浓度实验中存在严重的问题, O₃浓度在实际大气中存在显著的垂直分布规律,因此这样的布设方法与自然情况下并不一致,会过高估计大气气体成分的生态效应。此外,从管道中释放出来的O₃浓度极高,释放气体的管路与植物叶片的间距较小,直接喷射在叶片表面容易造成叶片的急性伤害。为了研究O₃对杨树人工林的影响,在北京延庆建立了世界第一个杨树(*Populus deltoides*)人工林开放式O₃浓度升高与氮沉降研究平台(O₃-N-FACE)(图3)。改进样地内垂直布气方式,在16 m的正方形样地上方设置了8根长16 m的管道,从管道释放的O₃气体只需要通过自然风扩散2 m的距离即可实现有效布气。增加的

图3 北京延庆O₃-N-FACE系统。

Fig. 3 Overview of O₃-N-FACE facility at Yanqing, Beijing.

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0223

O₃气体通过自由扩散和沉降方式向下移动更加符合自然大气沉降规律。研究对象杨树具有生长快的特点,在布气过程中需要保持气体释放的管道距离冠层1 m左右,避免高浓度O₃直接喷射到叶片表面。

2 国内外FACE系统的发展历史与现状

2.1 国外FACE发展历史与现状

温室和开顶箱是早期研究大气中气体浓度升高对植物影响的主要手段,但是研究人员逐渐认识到了在野外和(半)封闭环境下的植物生长存在显著差异(Tissue *et al.*, 1996)。因此在开放环境条件下定量增加气体浓度的实验设备开始受到广泛关注。早期FACE系统是将低矮的植物暴露于大气痕量气体中,如SO₂和O₃(Greenwood *et al.*, 1982; Mooi & van der Zalm, 1985)。1989年在亚利桑那州建立了全球第一个CO₂-FACE实验(Hendrey *et al.*, 1993),用于研究CO₂浓度升高对C₃和C₄作物的影响。此后全球范围内建立了很多的FACE系统,大量FACE系统在1995–2000年开始运行。作物FACE系统研究对象都是长势较矮小的作物(高度≤2 m),且作物长势一致,在浓度控制的过程中因冠层气流扰动小,释放的气体能够较为均匀地沉降到冠层。而森林的冠层生长高度不一致,释放的气体不能均匀地扩散到样地内部。为了克服这些问题,布鲁克黑文国家实验室采用从底部到冠层顶部垂直布气的方式,这种方式能够有效减少CO₂消耗量,降低运行成本(Hendrey *et al.*, 1999)。并且这种布气方式不受冠层非均匀分布的影响。随着同位素技术的发展,在德国南部山毛榉(*Fagus longipetiolata*)和云杉(*Picea abies*)混交林内建立了能够长期升高冠层CO₂浓度和标记稳定同位素的综合系统,在系统设计中使用了在冠层内部垂直均匀布设PVC管道将δ¹³C为–46.9‰的CO₂均匀释放到冠层内部,在环境CO₂浓度基础上增加了约100 μmol·mol^{–1}(Grams *et al.*, 2011)。截至目前全球范围内已建成直径超过8 m的CO₂-FACE系统共有18个(表1),包括了荒漠、草地、森林和农田等多个生态系统。澳大利亚悉尼的EucFACE是全球目前唯一正在运行的森林CO₂-FACE系统,而其他森林FACE系统停止运行。EucFACE的研究对象是原始桉树林,设定的目标CO₂浓度为550 μmol·mol^{–1},是目前澳大利亚最大的研究气候变化的设施。利用CO₂-FACE研究发现大气CO₂升高对陆地生态系统

存在显著的“施肥”效应,增加了叶片光合能力和净初级生产力,但是随着时间的推移这种增加效应会随着生态系统氮可利用性的限制而逐步减弱(Long *et al.*, 2004; Long, 2006)。

相比于CO₂-FACE, O₃-FACE的发展相对滞后,大量的O₃-FACE是在CO₂-FACE得到广泛的应用后改扩建而来的。目前O₃-FACE系统在全球范围内共有7个。美国伊利诺伊大学香槟分校在CO₂-FACE的基础上进行扩建,建设了全球第一个大型作物O₃-FACE (SoyFACE)用于研究O₃胁迫对大豆和玉米的影响。利用SoyFACE筛选出了不同O₃敏感性的大豆和玉米品种,为应对全球变化的农业精细化育种提供了明确方向(Yendrek *et al.*, 2017; Choquette *et al.*, 2019)。在美国威斯康辛州的Aspen FACE也增加了O₃-FACE研究O₃对山杨(*Populus tremuloides*)的影响,结果表明O₃浓度升高使山杨生物量降低了23%(Karnosky *et al.*, 2003),且这种影响随着实验时间的增加日益加重。德国的Kranzberg O₃-FACE研究结果也表明O₃显著降低了山毛榉的生产力(Pretzsch *et al.*, 2010)。目前两座森林O₃-FACE系统已经停止运行,美国伊利诺伊大学香槟分校的SoyFACE (大豆和玉米)也停止运行。进入2010年后在日本和意大利建设了两座小型O₃-FACE系统。尽管这些系统与大型森林FACE缺乏可比性,但是小型的FACE具有好的灵活性能根据实验设计不同更换研究对象,有助于研究不同物种的O₃敏感性。

2.2 中国FACE发展历史与现状

我国具有丰富的生态系统类型,而高原极地又是全球变化的热点区域。然而中国FACE研究的应用起步于2001年,比美国晚了10多年,我国建设了3个大型FACE系统,其中两个为稻麦轮作FACE,另一个为杨树人工林O₃-FACE系统(表2)。中国科学院南京土壤研究所在无锡年余农场建立了中国第一个稻麦CO₂-FACE,并于2007年在江都小纪镇建立了中国第一个稻麦O₃-FACE系统(唐昊治等, 2010; Tang *et al.*, 2011),随后在FACE样地内研究空气增温对作物的影响。利用这一FACE系统研究了CO₂和O₃浓度升高对作物产量和稻麦品质等方面的影响,同时也研究了农田生态系统的养分循环过程(杨连新等, 2009)。随着CO₂浓度的升高,水稻产量增加了5%–400%。因此全球变化中的CO₂浓度升高表现为施肥效应,且不同品种表现出不同应答能力。而在

表1 国外自由空气中气体浓度增加(FACE)系统概况

Table 1 Summary of Free-Air Concentration Enrichment (FACE) facilities owned by abroad countries

名称 Name	生态系统 Ecosystem	控制因子 Factor	地点 Location	开始运行时间 Start time	运行状态 Status	文献 Reference
Maricopa FACE	C ₃ 和C ₄ 作物 C ₃ and C ₄ crop	CO ₂	美国亚利桑那州 Arizona, USA	1989	停止运行 Stop	Lewin <i>et al.</i> , 1994
Rice FACE	水稻 <i>Oryza sativa</i>	CO ₂	日本雫石町 Shizukuishi, Japan	1998	停止运行 Stop	Okada <i>et al.</i> , 2001
Tsukuba FACE	水稻 <i>Oryza sativa</i>	CO ₂	日本筑波 Tsukuba, Japan	2010	停止运行 Stop	
Rapolano Mid FACE	葡萄和茄子 <i>Vitis vinifera</i> and <i>Solanum melongena</i>	CO ₂	意大利基安蒂 Chianti, Italy	1995	停止运行 Stop	Miglietta <i>et al.</i> , 1997
Soy FACE	大豆和玉米 <i>Glycine max</i> and <i>Zea mays</i>	CO ₂ , O ₃	美国伊利诺伊州 Illinois, USA	2001	停止运行 Stop	
Iso FACE	山毛榉和云杉混交林 A mixed <i>Fagus longipetiolata</i> and <i>Picea abies</i> forest	CO ₂	德国克兰斯伯格森林 Kranzberg Forest, Germany	2007	正在运行 Running	Grams <i>et al.</i> , 2011
Duke Forest FACE	火炬松 <i>Pinus taeda</i>	CO ₂	美国北卡罗来纳州 North Carolina, USA	1996	停止运行 Stop	Hendrey <i>et al.</i> , 1999
Euc FACE	桉树 <i>Eucalyptus</i>	CO ₂	澳大利亚悉尼 Sydney, Australia	2012	正在运行 Running	
Oak Ridge	枫香 <i>Liquidambar</i>	CO ₂	美国田纳西州 Tennessee, USA	1998	停止运行 Stop	Norby <i>et al.</i> , 2001
POPFACE	杨树 <i>Populus tremula</i>	CO ₂	意大利维泰博省 Viterbo Province, Italy	1999	停止运行 Stop	Miglietta <i>et al.</i> , 2001
Swiss alpine treeline	挪威云杉 <i>Pinus sylvestris</i>	CO ₂	瑞士巴塞尔 Basel, Switzerland	2000	停止运行 Stop	
Aspen FACE	山杨 <i>Populus davidiana</i>	CO ₂ , O ₃	美国威斯康辛州 Wisconsin, USA	2001	停止运行 Stop	Dickson <i>et al.</i> , 2000
Kranzberg Ozone Fumigation Experiment (KROFEX)	成熟云杉和山毛榉 Grown-up <i>P. abies</i> and <i>F. longipetiolata</i>	O ₃	德国弗赖辛 Freising, Germany	2000	停止运行 Stop	Werner & Fabian, 2002
Sapporo Forest	山毛榉和橡树幼苗 <i>F. longipetiolata</i> and <i>Quercus albus</i> saplings	O ₃	日本北海道 Hokkaido, Japan	2011	停止运行 Stop	Watanabe <i>et al.</i> , 2013
BioCON	自然草地 Natural grassland	CO ₂	美国明尼苏达州 Minnesota, USA	1997	正在运行 Running	Reich <i>et al.</i> , 2001
Swiss Eschikon FACE	牧草 Pasture	CO ₂	瑞士 Switzerland	1993	停止运行 Stop	Zanetti <i>et al.</i> , 1996
Pasture FACE	牧草 Pasture	CO ₂	新西兰布尔斯 Bourse, New Zealand	1997	停止运行 Stop	Edwards <i>et al.</i> , 2001
Swiss calcareous FACE	草地 Grassland	CO ₂	瑞士 Switzerland		停止运行 Stop	
Irish seminatural FACE	半自然草地 Semi-natural Grassland	CO ₂	爱尔兰 Ireland		停止运行 Stop	
Nevada Desert	沙漠 Desert	CO ₂	美国内华达州 Nevada, USA	1997	停止运行 Stop	Jordan <i>et al.</i> , 1999
3D ozone FACE	盆栽 Plot	O ₃	意大利佛罗伦萨 Florence, Italy	2015	正在运行 Running	Paoletti <i>et al.</i> , 2017

品质的研究中,通过收集中国和日本CO₂-FACE实验的结果,评估了18种水稻(*Oryza sativa*)品种籽粒品质对CO₂浓度升高的响应,结果表明高浓度的CO₂处理中,水稻籽粒中的蛋白质含量下降了10%,铁、锌和维生素含量均下降(Zhu *et al.*, 2018)。水稻

作为全球范围内重要的粮食作物,营养含量的降低导致人在获取相同质量的食物后,所摄入的营养不能满足需求而造成“隐性饥饿”。O₃作为一种空气污染物严重威胁了稻麦的产量,未来O₃浓度升高25%会使冬小麦产量减少约20%,杂交水稻和常规粳稻

表2 中国自由空气中气体浓度增加(FACE)系统平台概况
Table 2 Summary of Chinese Free-Air Concentration Enrichment facilities

名称 Name	研究对象 Object	控制因子 Factor	研究机构 Research institution	地点 Location	开始运行时间 Start time	运行状态 Status	文献 Reference
China FACE	水稻和小麦 <i>Oryza sativa</i> and <i>Triticum aestivum</i>	CO ₂ , O ₃	中国科学院南京土壤研究所 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences	江苏江都 Jiangdu, Jiangsu	2001	停止运行 Stop	Tang <i>et al.</i> , 2011
O ₃ -FACE	杨树 <i>Populus deltoides</i>	O ₃	中国科学院生态环境研究中心 Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences	北京延庆 Yanqing, Beijing	2017	正在运行 Running	
CO ₂ -FACE	水稻 <i>O. sativa</i>	CO ₂ , 温度 CO ₂ , temperature	南京农业大学 Nanjing Agricultural University	江苏常熟 Changshu, Jiangsu		正在运行 Running	

减产10%–30% (彭斌等, 2014)。通过FACE研究明确了全球变化对我国粮食安全和粮食营养价值的影响。比较研究不同稻麦品种对CO₂升高的响应和O₃敏感性, 可为粮食品种选种和育种提供理论依据。

我国在研究大气气体浓度升高对森林生态系统影响时多利用OTC设施。OTC平台在研究植物对O₃升高的响应中有着不可替代的作用, 但植物营养状况等因素是影响植物O₃敏感性的主要因素。为了明确自然条件下的O₃影响, 2017年在北京延庆建设了我国第一个杨树人工林的O₃-FACE系统。研究内容涵盖了光合生理、植物次生代谢物、土壤微生物和根系周转等生态学过程, 为评估空气污染对中国陆地生态系统碳源汇及水分利用的影响提供了模型参数化参数。

3 FACE实验研究展望

3.1 FACE技术创新

随着国际上大型FACE的逐步停止运行, FACE技术创新进入了瓶颈。目前建设的FACE系统逐步在向小型化和简易化发展。过去的FACE基础建设量大, 在前期需要投入大量的建设成本。但是一旦建设好后不可移动也不可更换研究对象, 更像是一个一次性的研究项目。随着工业控制技术的提升和基础建设的简易化, 未来的FACE系统要注重集成化和可移动, 实现一次建设多次利用的目标。同时气体浓度的控制仍然是目前FACE系统的研究瓶颈, 如何将气体均匀地释放到植物冠层更加真实地模拟未来条件下的气体浓度, 需要摸索不同的气体释放方式, 同时在程序控制中结合气象因子实现稳定条件。

3.2 FACE研究的应用创新

3.2.1 加强地下生态过程的研究

地下生态过程是陆地生态系统的关键组成部分,

O₃损伤叶片后降低了植物的根冠比, 减缓了根系生长, 从而影响了土壤中的养分状况和微生物过程。但目前对O₃对地下生态过程影响的机制尚无定论, 且大量的研究是利用OTC内的盆栽实验, 而原位的FACE实验更有利于开展地下生态过程的研究 (Cheng *et al.*, 2012)。但已有的FACE研究还是以地上生态系统为主, 缺乏对地下过程的关注。同时随着地下生态过程观测技术和研究手段的快速发展, FACE实验今后应以地下生态系统为主要研究对象, 加强全球变化影响植物根系、凋落物归还、土壤碳氮转化与可利用性、土壤微生物结构与功能和土壤动物等地下生态过程的研究。揭示O₃影响地下过程的机制并定量全球O₃浓度升高对地下生态过程的影响, 并将其纳入到全球变化模型中。

3.2.2 开展全球变化背景下的多因子交互研究

CO₂/O₃浓度升高、干旱胁迫、氮沉降和降水格局改变等多因子实验能够揭示全球变化对生态系统的复合影响。多种非生物胁迫对植物个体的影响存在拮抗、协同和无交互作用等不同影响, 多个全球变化因子如何影响植物个体生理生态过程和生态系统需要利用实验进行验证。目前的研究已经表明干旱降低气孔导度减少了臭氧进入叶片的通量, 两者对植物个体存在拮抗作用 (Gao *et al.*, 2017)。CO₂浓度升高对植物具有施肥效应, 但随着土壤氮有效性的降低, 对陆地固碳的刺激作用逐渐降低 (Long, 2006)。因此单一因子的FACE实验不能真实反应环境变化对陆地生态系统的影响, 利用FACE技术设置多因子实验能够揭示多重非生物胁迫的影响, 能够为全球模型提供有力的理论基础。

3.2.3 加强基于FACE的浓度梯度实验

随着气体排放的加剧, 大气中CO₂和O₃浓度呈现不断升高的趋势。利用模拟浓度梯度的方法能够建立气体浓度与生态系统响应之间的剂量关系, 这

有助于将实验结果和结论进行外推, 解决全球模型中的关键参数, 实现在不同排放情景下的全球碳动态模拟。在过去的研究中主要是通过建立多个OTC实现气体浓度梯度, 已经建立了O₃与植物叶片光合速率、气孔导度和生物量的剂量关系(Shang *et al.*, 2017)。目前还没有利用FACE实验建立的剂量关系参数, 这主要是受限于FACE巨大的建设成本。未来可利用低成本的FACE建设技术, 在同一区域设置不同的浓度梯度控制实验, 与OTC取得的剂量关系结果进行比对, 优化模型的参数。

3.2.4 加强全球变化热点区域的研究

两极、赤道和高原地区是对全球变化较敏感的区域, 但目前的FACE研究主要集中在中纬度区域。利用FACE观测的数据进行全球模拟评估的时候, 高估或低估了全球变化对以上区域的影响。利用当前局限于中纬度地区的单点研究, 在整合分析中存在数据代表性不够全面的问题(Tian *et al.*, 2018)。全球联网实验是在全球不同区域采用相同的实验设计开展控制实验, 这有助于评估不同生态系统对全球变化过程的响应, 提供具有更高可比性的研究结果, 也为模型评估提供参数。因此未来需要关注在两极、赤道和高原区域的控制实验, 了解极地的生态系统对全球变化的响应过程与机理。

参考文献

- Ainsworth EA, Long SP (2005). What have we learned from 15 years of Free-Air CO₂ Enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165, 351–372.
- Ainsworth EA, Yendrek CR, Sitch S, Collins WJ, Emberson LD (2012). The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 637–661.
- Cheng L, Booker FL, Tu C, Burkey KO, Zhou LS, Shew HD, Ruffy TW, Hu SJ (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi increase organic carbon decomposition under elevated CO₂. *Science*, 337, 1084–1087.
- Choquette NE, Ogut F, Wertin TM, Montes CM, Sorgini CA, Morse AM, Brown PJ, Leakey ADB, McIntyre LM, Ainsworth EA (2019). Uncovering hidden genetic variation in photosynthesis of field-grown maize under ozone pollution. *Global Change Biology*, 25, 4327–4338.
- Cooper OR, Parrish DD, Ziemke J, Balashov NV, Cupeiro M, Galbally IE, Gilge S, Horowitz L, Jensen N, Lamarque JF, Naik V, Oltmans SJ, Schwab J, Shindell DT, Thompson AM, Thouret V, Wang Y, Zbinden RM (2014). Global distribution and trends of tropospheric ozone: an observation-based review. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2, 000029. DOI: 10.12952/journal.elementa.000029.
- Damour G, Simonneau T, Cochard H, Urban L (2010). An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell & Environment*, 33, 1419–1438.
- Dickson RE, Lewin KF, Isebrands JG, Coleman MD, Heilman WE, Riemenschneider DE, Sober J, Host GE, Zak DR, Hendrey GR, Pregitzer KS, Karnosky DF (2000). *Forest Atmosphere Carbon Transfer Storage (FACTS II) the Aspen Free-air CO₂ and O₃ Enrichment (FACE) Project: an Overview*. USDA Forest Service, North Central Research Station. https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nc214.pdf. DOI: 10.2737/nc-gtr-214.
- Edwards GE, Furbank RT, Hatch MD, Osmond CB (2001). What does it take to be C₄? Lessons from the evolution of C₄ photosynthesis. *Plant Physiology*, 125, 46–49.
- Feng ZZ, Uddling J, Tang HY, Zhu JG, Kobayashi K (2018). Comparison of crop yield sensitivity to ozone between open-top chamber and free-air experiments. *Global Change Biology*, 24, 2231–2238.
- Gao F, Catalayud V, Paoletti E, Hoshika Y, Feng ZZ (2017). Water stress mitigates the negative effects of ozone on photosynthesis and biomass in poplar plants. *Environmental Pollution*, 230, 268–279.
- Grams TEE, Werner H, Kuptz D, Ritter W, Fleischmann F, Andersen CP, Matyssek R (2011). A free-air system for long-term stable carbon isotope labeling of adult forest trees. *Trees*, 25, 187–198.
- Greenwood P, Greenhalgh A, Baker C, Unsworth M (1982). A computer-controlled system for exposing field crops to gaseous air pollutants. *Atmospheric Environment*, 16, 2261–2266.
- Han Y, Liu G, Zhu JG, Okada M, Yoshimoto M (2002). Rice-wheat rotational FACE platform II. Data processing software package. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 1259–1263. [韩勇, 刘钢, 朱建国, 冈田益己, 吉本真由美 (2002). 稻麦轮作FACE系统平台II. 系统控制和分析软件. 应用生态学报, 13, 1259–1263.]
- Hendrey GR, Ellsworth DS, Lewin KF, Nagy J (1999). A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 5, 293–309.
- Hendrey GR, Lewin KF, Nagy J (1993). Control of carbon dioxide in unconfined field plots//Hendrey GR. *Design and Execution of Experiments on CO₂ Enrichment Ecosystems Research Report 6. Commission of the European Communities. Ecosystem Research Report Series 6*, Brussels. 309–329.
- IPCC (2013). Summary for policymakers//IPCC. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York.
- IPCC (2017). Synthesis report/IPCC. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva.
- Jordan DNN, Zitzer SF, Hendrey GR, Lewin KF, Nagy J, Nowak RS, Smith SD, Coleman JS, Seemann JR (1999). Biotic, abiotic and performance aspects of the Nevada Desert Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) Facility. *Global Change Biology*, 5, 659–668.
- Karnosky DF, Zak DR, Pregitzer KS, Awmack CS, Bockheim JG, Dickson RE, Hendrey GR, Host GE, King JS, Kopper BJ, Kruger EL, Kubiske ME, Lindroth RL, Mattson WJ, McDonald EP, Noormets A, Oksanen E, Parsons WFJ, Percy KE, Podila GK, Riemenschneider DE, Sharma P, Thakur R, Sober A, Sober J, Jones WS, Anttonen S, Vapaavuori E, Mankovska B, Heilman W, Isebrands JG (2003). Tropospheric O₃ moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO₂: a synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen FACE project. *Functional Ecology*, 17, 289–304.
- Körner C (2003). Nutrients and sink activity drive plant CO₂ responses—Caution with literature-based analysis. *New Phytologist*, 159, 537–538.
- Leavitt SW, Paul EA, Galadima A, Nakayama FS, Danzer SR, Johnson H, Kimball BA (1995). Carbon isotopes and carbon turnover in cotton and wheat FACE experiments. *Plant and Soil*, 187, 147–155.
- Lewin KF, Hendrey GR, Nagy J, LaMorte RL (1994). Design and application of a free-air carbon dioxide enrichment facility. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70, 15–29.
- Liu G, Han Y, Zhu JG, Okada M, Nakamura H, Yoshimoto M (2002). Rice-wheat rotational FACE platform I. System structure and control. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 1253–1258. [刘钢, 韩勇, 朱建国, 冈田益己, 中村浩史, 吉本真由美 (2002). 稻麦轮作FACE系统平台I. 系统结构与控制. 应用生态学报, 13, 1253–1258.]
- Long SP (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 312, 1918–1921.
- Long SP, Ainsworth EA, Leakey ADB, Morgan PB (2005). Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 360, 2011–2020.
- Long SP, Ainsworth EA, Rogers A, Ort DR (2004). Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 591–628.
- Miglietta F, Lanini M, Bindi M, Magliulo V (1997). Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): design and performance of the CO₂-fumigation system. *Global Change Biology*, 3, 417–427.
- Miglietta F, Peressotti A, Vaccari FP, Zaldei A, deAngelis P, Scarascia-Mugnozza G (2001). Free-air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. *New Phytologist*, 150, 465–476.
- Mooi IJ, van der Zalm AJA (1985). Research on the effects of higher than ambient concentrations of SO₂ and NO₂ on vegetation under semi-natural conditions: the developing and testing of a field fumigation system; process description. First Interim Report to the Commission of the European Communities, EEC Contract ENV-677-NL. January–December 1983. Research Institute for Plant Protection, Wageningen, Netherlands.
- Norby RJ, Todd DE, Fuels J, Johnson DW (2001). Allometric determination of tree growth in a CO₂-enriched sweetgum stand. *New Phytologist*, 150, 477–487.
- Norby RJ, Zak DR (2011). Ecological lessons from free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 181–203.
- Nowak RS, Ellsworth DS, Smith SD (2004). Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂—Do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytologist*, 162, 253–280.
- Nussbaum S, Fuhrer J (2000). Difference in ozone uptake in grassland species between open-top chambers and ambient air. *Environmental Pollution*, 109, 463–471.
- Okada M, Lieffering M, Nakamura H, Yoshimoto M, Kim HY, Kobayashi K (2001). Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) using pure CO₂ injection: system description. *New Phytologist*, 150, 251–260.
- Paoletti E, Materassi A, Fasano G, Hoshika Y, Carriero G, Silaghi D, Badea O (2017). A new-generation 3D ozone FACE (Free Air Controlled Exposure). *Science of the Total Environment*, 575, 1407–1414.
- Peng B, Lai SK, Li PL, Wang YX, Zhu JG, Yang LX, Wang YL (2014). Interactive effects of ozone concentration and planting density on growth, development and yield formation of yangdao 6—A FACE study. *Chinese Journal of Rice Science*, 28, 401–410. [彭斌, 赖上坤, 李潘林, 王云霞, 朱建国, 杨连新, 王余龙 (2014). 臭氧与栽插密度互作对扬稻6号生长发育和产量形成的影响——FACE研究. 中国水稻科学, 28, 401–410.]
- Piikki K, de Temmerman L, Högy P, Pleijel H (2008). The open-top chamber impact on vapour pressure deficit and its consequences for stomatal ozone uptake. *Atmospheric Environment*, 42, 6513–6522.
- Pretzsch H, Dieler J, Matyssek R, Wipfler P (2010). Tree and stand growth of mature Norway spruce and European beech under long-term ozone fumigation. *Environmental Pollution*, 158, 1061–1070.

- Reich PB, Knops J, Tilman D, Craine J, Ellsworth D, Tjoelker M, Lee T, Wedin D, Naeem S, Bahaeddin D, Hendrey G, Jose S, Wragge K, Goth J, Bengston W (2001). Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition. *Nature*, 410, 809–810.
- Shang B, Feng ZZ, Li P, Yuan XY, Xu YS, Calatayud V (2017). Ozone exposure-and flux-based response relationships with photosynthesis, leaf morphology and biomass in two poplar clones. *Science of the Total Environment*, 603, 185–195.
- Tang HY, Liu G, Han Y, Zhu JG (2010). Ozone concentration enrichment system under fully free-air condition in agricultural field (O₃-FACE). *Soils*, 42, 833–841. [唐昊治, 刘钢, 韩勇, 朱建国 (2010). 农田开放体系中调控臭氧浓度装置平台(O₃-FACE)研究. *土壤*, 42, 833–841.]
- Tang HY, Liu G, Han Y, Zhu JG, Kobayashi K (2011). A system for free-air ozone concentration elevation with rice and wheat: control performance and ozone exposure regime. *Atmospheric Environment*, 45, 6276–6282.
- Tian D, Du EZ, Jiang L, Ma SH, Zeng WJ, Zou AL, Feng CY, Xu LC, Xing AJ, Wang W, Zheng CY, Ji CJ, Shen HH, Fang JY (2018). Responses of forest ecosystems to increasing N deposition in China: a critical review. *Environmental Pollution*, 243, 75–86.
- Tissue DT, Thomas RB, Strain BR (1996). Growth and photosynthesis of loblolly pine (*Pinus taeda*) after exposure to elevated CO₂ for 19 months in the field. *Tree Physiology*, 16, 49–59.
- Vingarzan R (2004). A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment*, 38, 3431–3442.
- Watanabe M, Hoshika Y, Inada N, Wang XN, Mao QZ, Koike T (2013). Photosynthetic traits of Siebold's beech and oak saplings grown under free air ozone exposure in northern Japan. *Environmental Pollution*, 174, 50–56.
- Werner H, Fabian P (2002). Free-air fumigation of mature trees. *Environmental Science and Pollution Research*, 9, 117–121.
- Whitehead D, Hogan KP, Rogers GND, Byers JN, Hunt JE, McSeveny TM, Hollinger DY, Dungan RJ, Earl WB, Bourke MP (1995). Performance of large open-top chambers for long-term field investigations of tree response to elevated carbon dioxide concentration. *Journal of Biogeography*, 22, 307–313.
- Yang LX, Wang YX, Zhu JG, Wang YL (2009). What have we learned from 10 years of Free Air CO₂ Enrichment (FACE) experiments on rice CO₂ and grain yield. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1486–1497. [杨连新, 王云霞, 朱建国, 王余龙 (2009). 十年水稻FACE研究的产量响应. *生态学报*, 29, 1486–1497.]
- Yendrek CR, Erice G, Montes CM, Tomaz T, Sorgini CA, Brown PJ, McIntyre LM, Leakey ADB, Ainsworth EA (2017). Elevated ozone reduces photosynthetic carbon gain by accelerating leaf senescence of inbred and hybrid maize in a genotype-specific manner. *Plant, Cell & Environment*, 40, 3088–3100.
- Zanetti S, Hartwig UA, Luscher A, Hebeisen T, Frehner M, Fischer BU, Hendrey GR, Blum H, Nosberger J (1996). Stimulation of symbiotic N₂ fixation in *Trifolium repens* L. under elevated atmospheric pCO₂ in a grassland ecosystem. *Plant Physiology*, 112, 575–583.
- Zhu CW, Kobayashi K, Loladze I, Zhu JG, Jiang Q, Xu X, Liu G, Seneweera S, Ebi KL, Drewnowski A, Fukagawa NK, Ziska LH (2018). Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries. *Science Advances*, 4, eaq1012. DOI: 10.1126/sciadv.aaq1012.

特邀编委: 温学发 编辑: 赵航