

《蒙特利尔议定书》管控下中国臭氧层消耗物质排放量的变化

Xuekun Fang^{†,‡,*}, A. R. Ravishankara^{§,*}, Guus J. M. Velders^{||,∇}, Mario J. Molina[⊥], Shenshen

Su^{#,‡}, Jianbo Zhang[‡], Jianxin Hu^{‡,*}, Ronald G. Prinn[†]

[†]麻省理工学院全球变化科学中心, 剑桥, MA 02139, 美国

[‡]北京大学环境科学与工程学院, 北京大学, 北京 100871, 中国

[§]科罗拉多州立大学化学与大气科学系,, Fort Collins, 科罗拉多 80523, 美国

^{||}国家公共卫生与环境研究所(RIVM), P.O. Box 1, 3720 BA Bilthoven, 荷兰

[∇]乌特勒支大学乌得勒支海洋与大气研究所 (IMAU),, 荷兰

[⊥]加州大学化学与生物化学系,, 圣地亚哥, La Jolla, CA 92093, 美国

[#]电力规划与工程研究所, 北京 100120, 中国

TOC

Emissions of ozone-depleting substances in China



摘要

臭氧层的消耗及其恢复，以及臭氧层消耗物质（ODSs）及其替代品对气候的影响，受到科学界和公众的广泛关注。目前中国是 ODSs 及其替代品的最大消费者（和排放者），本文报告了中国的这些物质的排放量。基于上报的生产和使用情况，我们首次提供了从 1980 年开始的中国 ODSs 和其替代物氢氟碳化物（HFC）的排放信息。我们也评估了控制 ODS 的消费和排放对臭氧层（以 CFC-11 当量计）和气候（以 CO₂ 当量计）的影响及其成本。此外，我们发现，虽然只要完全符合《蒙特利尔议定书》，中国未来的 ODS 的排放量有可能准确估算，但到 2050 年 HFCs 的排放量不确定性很大。我们的研究表明，比《蒙特利尔议定书基加利修正案》下的管控措施更严格的未来几十年 HFCs 控制措施将有助于缓解全球气候变化。

关键词：臭氧层；气候变化；蒙特利尔议定书；臭氧层消耗物质；可持续；中国

前言

1987 年，《蒙特利尔议定书》签订，并在后续的时间里逐渐修订，其目的旨在通过逐步淘汰臭氧消耗物质（ODSs）的生产和消费¹，例如，氟氯化碳（CFCs），四氯化碳，甲基氯仿（1,1,1-三氯乙烷），哈龙，甲基溴（溴甲烷）和氟氯烃（HCFCs），来尽量减少臭氧层的消耗。CFCs 最初由具有较小臭氧消耗潜能的 HCFCs 取代，也可以通过非 ODS 或技术替代。HFCs 和其他物质或技术正在逐步取代 HCFCs。HFC 基本上不会破坏臭氧层，但其中有很多是强力的温室气体（GHGs）²⁻⁴。

中国是《蒙特利尔议定书》下的第 5 条国家，于 1991 年批准了该议定书。因此，中国需要在 1999 年之前冻结 CFCs 和哈龙的生产和消费，然后到 2010 年实现 100% 的淘汰¹。中国还需要在 2013 年之前冻结 HCFCs 的生产和消费，并在 2040 年前完全淘汰¹。此外，多边基金（蒙特利尔议定书的多边基金）的财政支持帮助促成了这一过程，自 1990 年代初以来，多边基金补贴中国的 ODSs 淘汰项目总额约为 12 亿美元（以 2014 年美元计算）。现在，了解在过去三十年（《蒙特利尔议定书》在中国实施之前和之后），中国的 ODS 消费量/排放量是如何变化的是一件十分有趣的工作。尤其是中国目前是全球 ODS 总排放量的最大贡献

者³。

之前的一些研究已经给出了中国 ODSs 排放的自下而上估算结果（例如，见⁵⁻⁷）。也有一些基于现场大气测量结果，通过自上而下的方法估算得到的几年内中国臭氧层消耗物质的排放量结果⁸⁻¹¹。但是，所有这些研究都值涵盖了一些离散的年份和有限数量的 ODSs 和 HFCs。因此，无法全面评估中国实施《蒙特利尔议定书》的影响。

本研究提供了 1980 年至 2014 年这三十年间中国 ODSs 和 HFCs 的全面排放清单。同时评估了中国实施《蒙特利尔议定书》对臭氧层和气候保护的影响。本研究还讨论了到 2050 年 ODS 和 HFCs 未来排放控制的可能优先选项。

研究方法

估算各部门 ODS 和 HFCs 排放量

本文总共研究了 11 种 ODSs（CFC-11，CFC-12，CFC-113，四氯化碳，甲基氯仿，甲基溴，Halon-1211，Halon-1301，HCFC-22，HCFC-141b 和 HCFC-142b）和 9 种 HFCs（HFC-23，HFC-32，HFC-125，HFC-134a，HFC-143a，HFC-245fa，HFC-152a，HFC-227ea 和 HFC-236fa）。在中国，共有 13 个工业（使用）部门广泛使用 ODSs，其中，发泡、工商制冷、家用空调是三大主要部门，其他十个部门则较小。本研究使用的排放量计算步骤流程图如图 S1 所示。表 S1 列出了各 ODS 和 HFCs（j）在中国的应用部门（i）。本研究没有涉及其他物质（如 CFC-114，CFC-115，Halon-1202，Halon-2402，HCFC-123 和 HCFC-124），因为它们的消费和排放在中国可以忽略不计⁵。化学式、寿命、ODP 和 GWP 等相关信息如表 S2 所示。

补充信息中提供了计算 ODS 排放量的详细方法，这里仅作简要介绍。本研究对以下 13 个不同部门的排放量进行了估算：（1）冰箱，（2）冷柜，（3）家用空调，（4）汽车空调，（5）工商制冷，（6）发泡剂，（7）溶剂，（8）烟草工业，（9）气溶胶推进剂，（10）化学处理剂，（11）消防，（12）甲基溴的使用，和（13）HCFC-22 的生产。前四个部门 ODS 排放量由产品的销售量和生产、运行、维修和报废过程中的排放率计算而得。其他部门的 ODS 排放量则通过对消费数据使

用特定的排放函数得到。排放函数主要来源于《IPCC 国家温室气体清单指南》¹² 以及 Wan 等人⁵ 和 Wang 等人¹³ 的研究。补充信息中提供了计算各部门 ODS 排放量的公式和参数。ODS 和 HFCs 消费量的预测（2015 - 2050 年）假定遵循《蒙特利尔议定书》所规定的淘汰 ODS 和逐步削减 HFCs 时间表（见表 S3；对《蒙特利尔议定书》未规划的年份进行线性插值）。

对各部门每种化学品的排放和消费量按年进行汇总。本研究报告了各个部门（图 S2a）和各种 ODS（图 S3）的年消费量和年排放量。标题为“Supplementary_Data.xlsx”的文件中提供了这些数据。

HCFC-22 产量增加，HFC-23 排放量也由此增加^{14,15}。为了评估《蒙特利尔议定书》对中国的影响，本研究仅计算了替代品用途的 HCFC-22 生产造成的 HFC-23 的排放，而非原料用途的 HCFC-22 生产（参见 SI 文本）。

按质量、CFC-11 当量和 CO₂ 当量表示，本研究中 ODS 总排放量的估计值与基于 Gosan 站点大气监测数据的自上而下的估计值 10 偏差在 0.1%、0.4% 和 4.7% 以内（图 S4）。按质量和 CO₂ 当量表示（图 S5），HFCs 总排放量的估计值与自上而下估计值的偏差在 6.4% 和 3.2% 以内。这表明本研究的自下而上估计值是稳健的。

评估《蒙特利尔议定书》的影响

为预测“不执行《蒙特利尔议定书》”情景下的排放量，通过使用 1995 年（即中国开始转变之前）的 CFCs 排放谱，将 2012 年（开始管控 HCFCs 的 2013 年之前）CFCs、HCFCs 和 HFCs 的实际排放量转换为虚拟的当年“CFCs 排放量”。1996 - 2011 年和 2013 - 2015 年间的虚拟排放量分别根据已知的 1995 年排放量和预测的 2012 年（虚拟）排放值进行线性插值和外推。请注意，这一预测并非基于 1991 - 1995 年间排放量的增加趋势。避免的排放量等于“不执行《蒙特利尔议定书》”情景下的排放量与实际排放量之间的差异。ODS 对平流层臭氧（一种温室气体）的消耗，会部分抵消 ODS 作为温室气体对温室效应的贡献^{16,17}。在本研究中，考虑到这种抵消作用，在计算净实际避免排放量时，假设 ODS 的 CO₂ 排放当量的预测值与实际值之间存在 20% 的差异。请注意，在评估《蒙特利尔议定书》减排量时，本研究排除了 HCFC-22 和 R-410A（R-410A 是 HFC-125 和 HFC-32 的混合物）在家用空调和挤塑聚苯乙烯（XPS）泡沫部门的排放量。它

们被排除在外，是因为这两个部门没有用 HCFCs 替代 CFCs，即《蒙特利尔议定书》在 2013 年之前没有对这两个部门采取控制措施。重要的是要注意，如果使用不同 ODS 消费预测情景，估算的避免排放量也会不同。因此，我们计算的避免排放量应视为合理的估算，而不是绝对准确的数字。

第 j 年特定 ODS _{i} 的摩尔分数由该 ODS 的年排放量、分子量、寿命、全球大气分子数和其它输入数据计算而得（如公式 1-3 所示）。

$$\frac{dC_i}{dt} = F_i \times E_i - \frac{C_i}{\tau_i} \quad (1)$$

对公式(1)进行积分，得到:

$$C_{i,j} = C_{i,j-1} \times \exp\left(-\frac{1}{\tau_i}\right) + F_i \times E_{i,j-1} \times \tau_i \times (1 - \exp\left(-\frac{1}{\tau_i}\right)) \quad (2)$$

这里的 $C_{i,j}$ 和 $C_{i,j-1}$ 为摩尔分数 (pmol mol⁻¹)， $E_{i,j-1}$ 为 ODS 的年排放量 (kg yr⁻¹)， τ_i 为 ODS 的寿命(年)， F_i (pmol mol⁻¹ kg⁻¹) 是将排放的质量转化为全球摩尔分数的因子。

$$F_i = \left(\frac{N_A}{N_a}\right) \frac{F_{surf}}{M_i} = 5.68 \times 10^{-9} \frac{F_{surf}}{M_i} \quad (3)$$

这里的 M_i 为 ODS i 的分子量(kg mole⁻¹)， N_a 为全球大气分子数， N_A 为阿伏伽德罗常数， F_{surf} 是将全球地表平均摩尔分数转化为全球大气平均摩尔分数的因子，对所有 ODS 该值都取 1.07^{19,20}。

结果与讨论

中国的 ODSs 历史排放

中国的 ODS 排放量估算结果如图 1 及图 S2 所示。相对于已有的研究，本研究涵盖了几乎全部 ODS 及其相关行业在较长周期内(1980-2014)的排放量。Li et al.¹⁰ 曾基于中国下风向的东亚地区的 ODS 浓度的地表观测数据(图 S4)，使用种间相关法自上而下对 ODS 排放进行估算。本研究估算结果与该研究的结果吻合较好。由此可见，本研究对 ODS 消费量与排放量的估算可能是目前为止最接近

实际情况的。

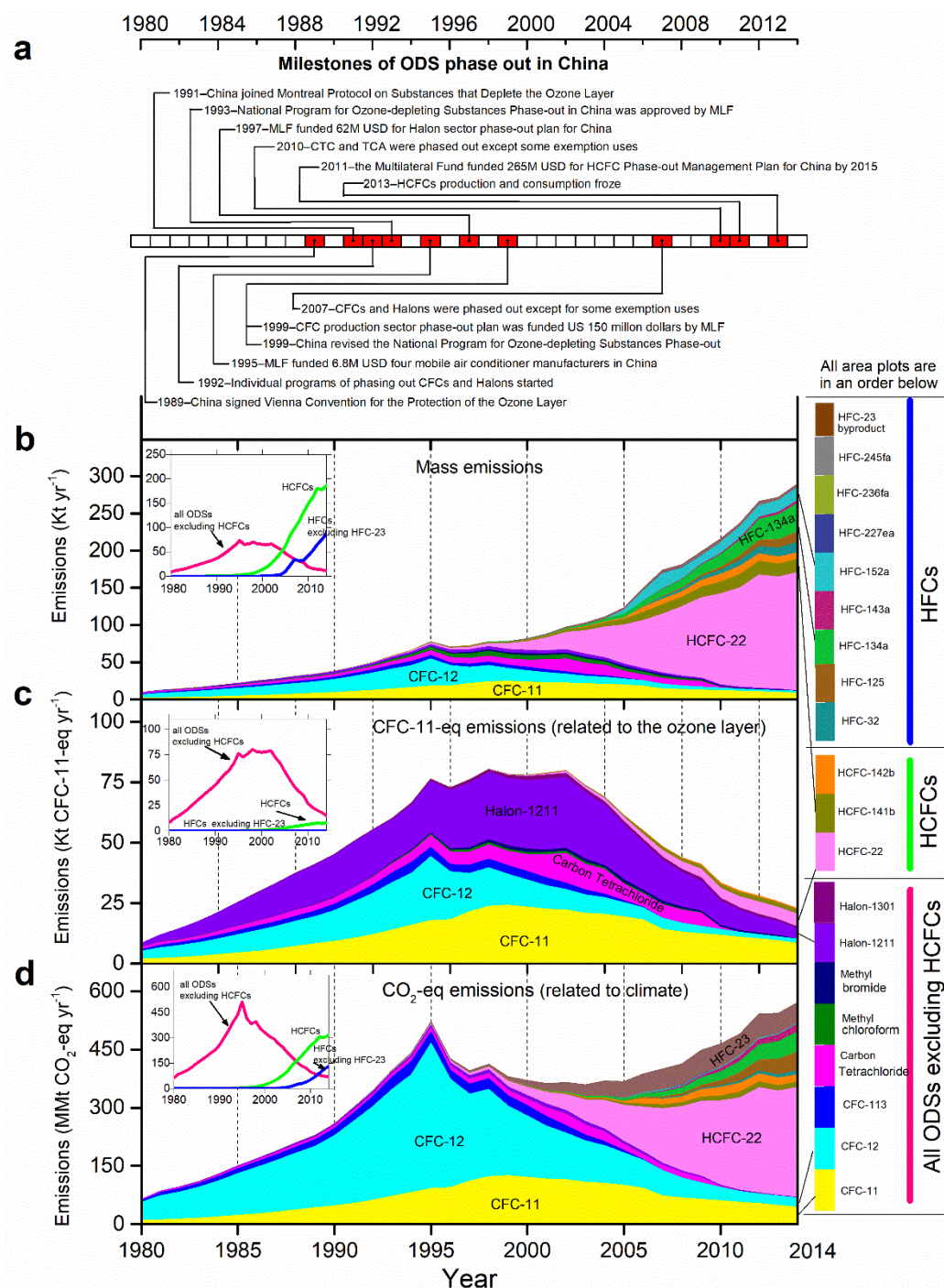


图 1.中国臭氧消耗物质（ODS）和替代物氢氟碳化物（HFC）的历史（1980-2014）排放量
a, 中国 ODS 淘汰的时间表. b, 各 ODS 和 HFC 的排放量. c,CFC-11 当量排放, d, CO₂ 当量排放. 插图展示了一些物质的加和贡献, 包括除去 HCFCs 的其余所有 ODSs (红线), HCFCs (绿线) 和去掉 HFC-23 的其余 HFCs (蓝线). 需要注意的是国内分散剂用途的 HCFC-22 生产带来的 HFC-23 排放包括在内。

ODS 的总排放量在 1980 年为每年 9 Kt, 到 2014 年增长至每年 196 Kt(错误!)

未找到引用源。b)。部分 ODS 在消费后会进入库存，例如进入冰箱或制冷空调，因此这些年份的 ODS 排放量要小于消费量(例如 2014 年消费量为每年 237 Kt)。其中，消防，气溶胶，溶剂和其他行业的部分消费和排放量的占比逐年减少（图 S2），表明中国在这些行业已经使用非消耗臭氧层物质替代品对 ODS 进行替代。这与中国实施“蒙特利尔议定书”而采取的行动的时间表能较好的对应（图 1a）。例如，在 1997 年 MLF 向中国提供了 6200 万美元后，于 20 世纪 90 年代后期，中国开始进行哈龙的淘汰。而与之对应的，Halon-1211 和 Halon-1301 的消费量在这个时间点之后迅速减少。

臭氧消耗潜能（ODP）加权排放，也称为 CFC-11 当量排放，是经常用于臭氧层保护领域的指标。本研究计算了中国所有 ODS 的 CFC-11 当量总排放(其中采用了最新版本 ODP 值，如表 S2 所示)。结果显示，中国的 CFC-11 当量总排放由 1980 年的 8 Kt CFC-11 当量每年增长至 1998 年的 80 Kt CFC-11 当量 每年并达到峰值，随后下降至 2014 年的 22 Kt CFC-11 当量 每年 (错误!未找到引用源。c)。20 世纪 90 年代后期总 CFC-11 当量消费量和排放量的减少表明中国采取的控制措施符合《蒙特利尔议定书》，成功地逐步淘汰了中国的 ODSs。

全球变暖潜能值（GWP; 100 年时间范围）加权排放（也称为 CO₂ 当量排放）是评估气候影响的重要指标。³ 中国的 ODS 的 CO₂ 当量总排放量从 1980 年的每年 64 百万立方公吨 CO₂ 当量 每年（下称为 MMt CO₂ 当量每年）增加到 1995 年的峰值 519MMt CO₂ 当量 每年。随后下降至 2006 年的 307 MMt CO₂ 当量每年。值得注意的是，在 2005 年之后，HCFC 的总质量排放量（图 1b 中的绿线）超过了所有其他消耗臭氧层物质的排放量的总和（图 1b 中的红线）。然而由于 HCFC 的 ODP 值及 GWP 值均相对于 CFCs 较低，其 CFC-11 当量排放量及 CO₂ 当量排放量（图 1c，图 1d 中的绿线）小于所有其他 ODS 的相应排放量（图 1c、图 1d 中的红线）。

计算国家及全球尺度历史排放的意义

中国 ODSs 的 CFC-11 当量排放量占全球 ODSs 的 CFC-11 当量排放量(根据 Rigby et al.²¹ 的更新数据)的比例从 1980 年的 1.0%增加到 1997 年的 33%，然后下降到 2014 年的 4.5%（图 2a）。然而，中国 ODSs 和 HFCs 的 CO₂ 当量总排放量占全球 ODSs 和 HFCs 的比例从 1980 年的 0.9%逐步增加到 2014 年的 24%（图 2b），这凸显了中国对全球 ODS 和 HFC 排放导致的气候变化的贡献的重要

性日益增加。

中国 ODSs 和 HFCs 的 CO₂ 当量总排放量占本国 CO₂ 总排放量的比例从 1980 年的 4.6% 增加到 1995 年的 18%，然后在 2014 年下降到 6.4%（图 2c），表明 ODSs 和作为替代物的 HFCs 的排放是仍是中国温室气体排放的重要组成部分。当然，过去几十年减少的部分原因是中国的 CO₂ 总排放量持续增加。如果没有《蒙特利尔议定书》，图 2c 中 1995 年以后的年份所占的比例将更大（例如，根据没有“蒙特利尔议定书”的预计排放量，2014 年的比例为 19%；详见“方法”部分）。中国 ODSs 和 HFCs 的 CO₂ 当量总排放量相对于全球 CO₂ 当量总排放量的比例从 1980 年的 0.4% 增加到 1995 年的 2.3%（同时，CO₂ 排放总量也是增加的），随后 2008 年降至最低值 1.4%，然后再次增加，在 2014 年达到 1.7%（图 2d）。这表明中国的 ODSs 和 HFCs 排放在全球温室气体减排中的作用不可忽视。显然，中国的 ODSs 和 HFCs 排放仍然很重要，值得持续关注。

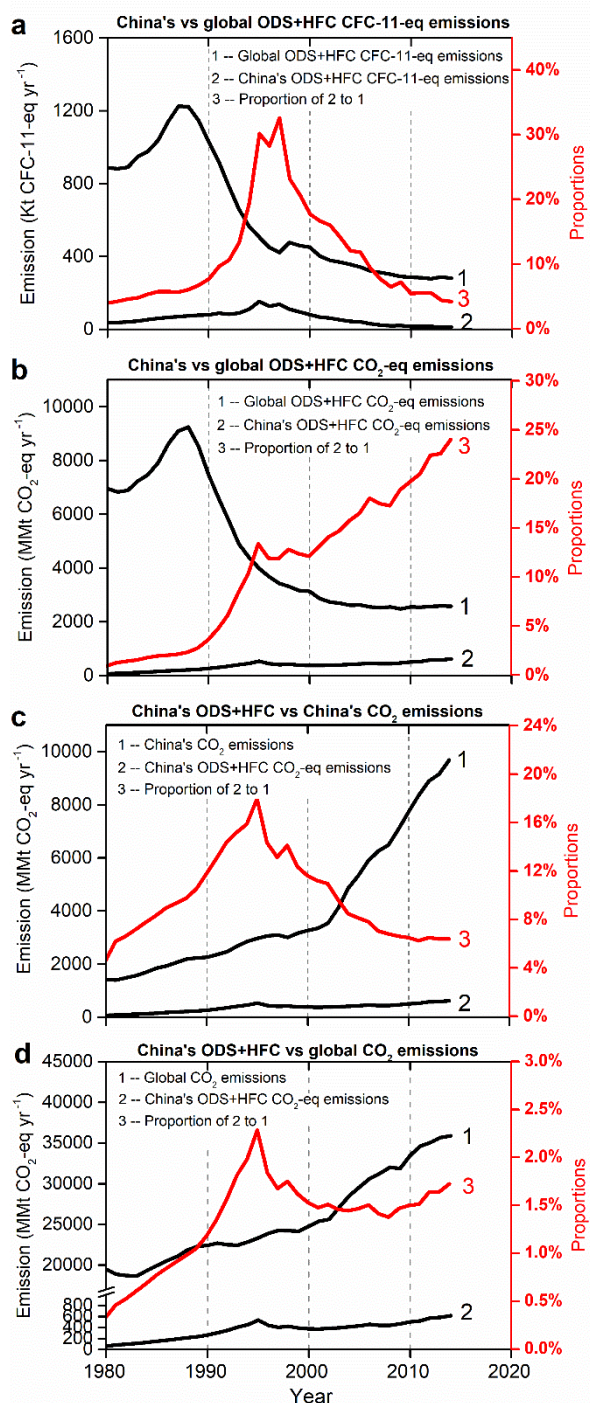


图 2. 全球和国家尺度下的历史排放 (1980-2014). 中国 ODS 和 HFCs 的排放与全球 ODS 和 HFC 的 CFC-11 当量排放量的比较: (a) 全球 ODS 和 HFCs 的二氧化碳当量排放; (b) 中国二氧化碳排放; (c) 全球二氧化碳排放; (d) 全球 ODS 和 HFCs 排放 (Rigby et al.²¹); 中国 1980-2013 年和 2014 年二氧化碳排放分别引自 Liu et al.²⁶ 和全球碳项目估算²⁵. 全球二氧化碳排放量源于全球碳项目估算²⁵. 在所有图像中, 贡献比例以红线表示 (右轴)

中国 ODS 及 HFC 的减排前景

中国 ODS 的排放在未来的发展受到决策者, 研究人员和公众的广泛关注。

按照《蒙特利尔议定书》的要求，按质量计算的 ODS 的总消费量在 2012 年达到其峰值，预计到 2040 年逐渐减少到零（图 S2a）。然而，本项研究发现，按质量计算的 ODS 总排放量的峰值为 2017 年的 206 Gg 每年（图 S2c）。在 2015 - 2050 年期间，HCFC-22，HCFC-141b 和 HCFC-142b 将成为造成消耗臭氧层物质总排放量的主要化合物，分别占总质量排放量的 70%，21% 和 8%。同时 CFC-11 和 CFC-12 也将被排放。室内空调，工业/商业制冷和泡沫塑料行业将分别约占消费和排放总量的三分之一（图 S2b，图 S2d）。因此，这三种化合物及三个行业是中国未来 ODS 减排的潜在目标。在未来三十年，中国的 ODS 消费量（主要是 HFCs）将受到《蒙特利尔议定书》淘汰时间表的限制。因此，ODS 的排放量将由对应的淘汰时间表和库存释放确定。基于这些因素，如果假定中国继续履行《蒙特利尔议定书》，就可以对中国未来的 ODS 排放量进行估算。

一项最近的研究指出，在 2002 年至 2014 年期间，CFC-11 的排放量（根据全球监测值推算）大致保持不变，而在 2014- 2016 年期间相对于 2002- 2012 年平均值增加了 13 ± 5 Gg 每年（ $25 \pm 13\%$ ）。²² 这一发现与 CFC-11 排放量会因其生产停止而继续减少的预期不符。该研究的作者认为，这种持续的、较大的排放量（超出对库存排放量的预期值）可能是由于在东亚存在未报告的生产行为。其他主要消耗臭氧层物质（例如 CFC-12）的排放量是否存在相似的增加的现象则没有在该研究中提及。

再次说明，本文研究的是已经报道或列入生产计划的产品和库存，无法确定非法的生产和使用，因为这些是国家无法知道和报道的。Montzka 等人的研究强调了持续监测、报道和证实 CFC 的必要性，这对履约的成功实施是必不可少的。在这些物质 Montzka 等人准确的测量发现了那些潜在的、未被报道的排放，这部分排放量在今后很长一段时间将会是巨大且持久的。如果结果中东亚的排放确实来自中国，本研究中计算出的 CFC-11 排放量将小于中国实际的 CFC-11 排放量。但是，需要强调的是，Montzka 等人得到的未报道的排放量自 2012 年来是 13Gg 每年，占 2014 年全球 ODS 排放量（约 280Gg 每年）或等量 CFC-11 的一小部分（见图 2a 中的全球总量）。此外，它的值只是 20 世纪 80 年代后期排放量最大值的一小部分。

中国未来的 HFCs 排放量非常不确定，与制冷、空调和其他行业的需求以及中国氢氟碳化合物法规的增强有很大关系。HFCs 被广泛用作 CFCs 和 HCFCs 的替代品。如果没有对 HFCs 的监管（图 3 第一行；Fang 等²³），中国 HFC 的使用

量会随着 HCFC 的淘汰而急剧上升。然后，预计中国 HFCs 的排放量将从 2010 年的 49 百万吨 CO₂ 当量，增加到 2050 年的 2000-2800 百万吨 CO₂ 当量，这比历史上 CFC 和 HCFC 的排放总量的峰值（1995 年的 520 百万吨 CO₂ 当量）要大很多。图 3 中第 2 行的“2024 年淘汰情景”符合 2016 年 10 月 10 日至 14 日在卢旺达基加利举行的《蒙特利尔议定书》HFC 修正案的要求。²⁴ 这个情景引用了 Fang 等人的研究结果，²³ 即假设中国的 HFC 消费量将在 2024 年冻结在上一年的消费水平，然后按计划逐年减少。在这个减排情景下，预计中国 HFC 的排放量将在 2030 年达到 1000-1200 百万吨 CO₂ 当量的峰值²³，这个值仍然高于历史上 CFC 和 HCFC 排放量总和的峰值（1995 年 520 百万吨 CO₂ 当量）。比《基加利修正案》规定的更严格的 HFC 减排时间表在“2013 年北美提案”中就被例证说明了，这比《基加利修正案》提出的时间还要早(图 3 第三行，Fang 等²³)。这个减排时间表仅仅用于说明一个比《基加利修正案》的规定更为严格的 HFC 减排方案。即使在这个更为严格的方案下，HFC 排放量仍会超过历史上 ODS 排放量总和的峰值(转换为 CO₂ 当量)。

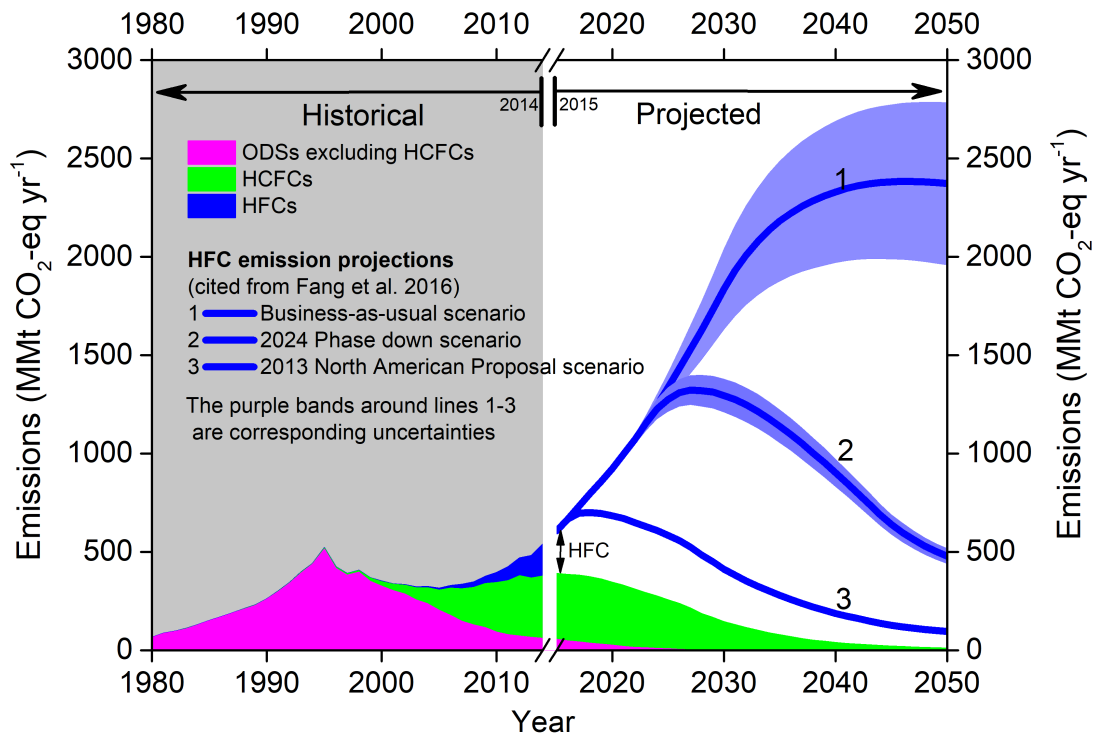


图 3. 中国 HFCs 和 ODS 的历史排放量 (1980–2014) 和排放量预测(2015–2050). HFCs 排放量的预测引用于 Fang et al.²³；线 1-3 周围的蓝色条带（HFC 排放预测）是各预测结果的不确定范围（同样引自 Fang et al.²³）。线 3 预测值基于更严格 HFC 淘汰时间表假设（类似于 2013 北美提议，先于《基加利修正案》执行）。“2024 淘汰情景”，即线 2，为接近《基加利修正案》的假设。

中国控制 ODSs 的影响和成本

如果没有执行《蒙特利尔议定书》以及缺少多边基金的财政支持，中国的 CFCs 和其他消耗臭氧层物质（不包括 HCFCs）的排放量可能会大幅增加。从 1995 - 2014 年期间替代品（例如 HCFC 和 HFCs）的消费增加可以看出这一点（图 S2）。本研究显示了来自中国的 ODS 和 HFCs 的实际排放量，以及不实施《蒙特利尔议定书》（图 4）的排放量，称为虚拟排放量。如果《蒙特利尔议定书》未在中国实施，全球大气 ODS 浓度将继续增加（图 S6 中的红线）并且会增加臭氧层的消耗；并且它也会推迟预计的臭氧层恢复。从观测到的对流层中的浓度可以明显看出，大多数受《蒙特利尔议定书》管控的 ODS 化学品的排放量正在减少。

本研究量化了《蒙特利尔议定书》在中国实施的影响。与 1995 年 80 千吨 CFC-11 当量年排放量相比，2014 年的排放量减少到 32 千吨（图 4a）。避免的排放（虚拟和实际 CFC-11 当量排放之间的差异）甚至更大，即在 2014 年为 185 千吨 CFC-11 当量，相当于该年全球 CFC-11 当量实际排放量的约 70%。估计 1995-2014 年间累计避免的 CFC-11 当量排放量（表 1）达到 1700 千吨。当然，对于避免排放的排放量的估计可能会不准确，因为我们知道中国（或任何其他国家）本来就会采取行动。然而，很明显，中国的行动直接有利于保护臭氧层，签署《蒙特利尔议定书》的其他国家的行动也是如此。

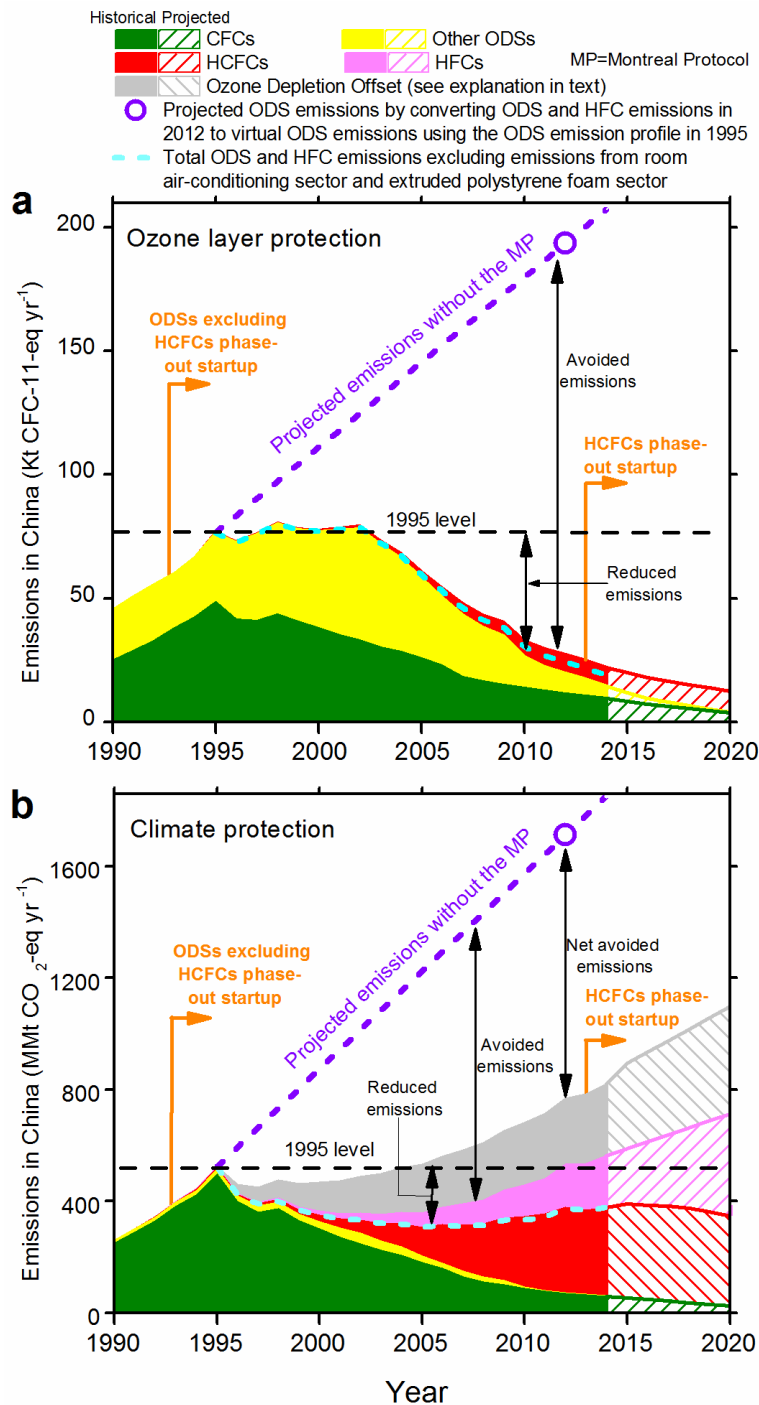


图 4.中国实施《蒙特利尔议定书》对保护臭氧层 (a)和气候(b)的贡献. 削减的排放量, 避免的排放量和净避免的排放量, 表征中国实施《蒙特利尔议定书》带来的贡献. 2014 年前的排放量为历史排放量, 2015 的排放量为预测排放量. 注意, 不实施《蒙特利尔议定书》条件下 (紫色虚线) 对 ODS 排放量的预测不是基于 1991-1995 年间具有增长趋势的排放 (见方法部分)。

Table 1. 中国减排对臭氧层（千吨 CFC-11 当量）和气候（百万吨 CO₂ 当量）的贡献，根据《蒙特利尔议定书》

	对臭氧层的贡献		对气候的贡献	
	减排量 ^a	避免的排放	减排量 ^a	避免的排放 ^b
2000	-1	33	172	395
2005	17	85	217	646
2010	46	147	190	784
2014	58	185	145	850
1995–2014	413	1700	3330	11000

^a 和 1995 年相比减排量。

^b 考虑了臭氧消耗补偿，因为大气 ODS 增加导致平流层臭氧削减，从而间接带来对地球气候的降温效应（见正文）。

本文还研究了与中国 ODS 控制协同的气候效益（图 4b）。与 1995 年排放量相比，2005 年 CO₂ 最大减排量最大值为 2.12 亿吨 CO₂ 当量。2014 年的净排放量为 8.5 亿吨 CO₂ 当量，这是我们可以获得的最新数据。这相当于中国化石燃料 CO₂ 排放量的约 9%。1995 - 2014 年期间累计避免的净排放量为 110 亿吨 CO₂ 当量，大于中国 2014 年 CO₂ 的排放总量即 96.8 亿吨^{25, 26}，即中国在实施《蒙特利尔议定书》之后，二十年中避免了相当于一年的 CO₂ 排放量当量。

截至 2011 年，中国的 ODS 淘汰行动已从多边基金获得大约 12 亿美元（2014 年美元）的财政支持。估计到 2011 年累计减少和避免的 CO₂ 排放当量分别约为 2880 万吨和 8550 百万吨 CO₂ 当量。因此，捐助机构为避免和减少 CO₂ 排放的行动成本分别为 0.14 美元和 0.42 美元每 CO₂ 当量。根据欧盟排放交易计划²⁷，这些数字远低于 2008 年 4 月至 2014 年 12 月期间每吨 2.9-37.8 美元的 CO₂ 当量价格。因此，很明显，多边基金的方法在减少排放方面是有效的，而且很可能对捐助国来说具有很高的成本效益。

在未来三十年，中国的 ODS 消费量（主要是 HCFCs）将受到《蒙特利尔议定书》淘汰时间表的严格限制，这将继续扩大过去 20 年议定书对臭氧层保护的效益。然而，由于 HCFCs 使用量的增加，其对气候的影响将面临挑战。即使在 HFC 控制排放的情景（即“2024 年淘汰情景”；图 3 第 2 行）下，HFC 排放所产生的效益（例如，2030 年的 1150 百万吨 CO₂ 当量每年）将超过通过减少 ODS 排放而实现的气候效益。为了保持这种气候协同效益，中国的 HFC 的使用需要比《蒙特利尔议定书-基加利修正案》中所规定的更严格。

启示

上述仅仅基于上报的生产和使用情况对中国臭氧层消耗物质排放量变化的分析结果,看起来符合《蒙特利尔议定书》。这种减少表明,未来 HFCs 的淘汰可以借鉴《蒙特利尔议定书》规定下的臭氧层消耗物质淘汰的成功机制。此外,如果类似于这种 HFCs 大排放量国家的淘汰方式被一些 HFCs 排放正在增加的其他国家(例如印度)制定并遵守,则氢氟碳化合物的淘汰将对减缓全球气候变化作出重大贡献。此外,本研究中使用到的方法可用于研究其他臭氧层消耗物质和 HFCs 排放较高的国家,特别是缺乏对《蒙特利尔议定书》执行情况的全面评估的发展中国家。

参考文献

- (1) United Nations Environment Programme. *Handbook for the Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, seventh ed.*, Nairobi, Kenya, 2009. http://ozone.unep.org/Publications/MP_Handbook/MP-Handbook-2009.pdf.
- (2) Hurwitz, M. M.; Fleming, E. L.; Newman, P. A.; Li, F.; Mlawer, E.; Cady-Pereira, K.; Bailey, R. Ozone depletion by hydrofluorocarbons. *Geophys Res Lett* **2015**, 42 (20), 8686-8692.
- (3) World Meteorological Organization. *Assessment for Decision-Makers: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 56*, Geneva, Switzerland, 2014.
- (4) Ravishankara, A. R.; Turnipseed, A. A.; Jensen, N. R.; Barone, S.; Mills, M.; Howard, C. J.; Solomon, S. Do Hydrofluorocarbons Destroy Stratospheric Ozone. *Science* **1994**, 263 (5143), 71-75.
- (5) Wan, D.; Xu, J. H.; Zhang, J. B.; Tong, X. C.; Hu, J. X. Historical and projected emissions of major halocarbons in China. *Atmos. Environ.* **2009**, 43 (36), 5822-5829.
- (6) Zhao, X. Y.; Duan, H. B.; Li, J. H. An evaluation on the environmental consequences of residual CFCs from obsolete household refrigerators in China. *Waste Manage* **2011**, 31 (3), 555-560.
- (7) *Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.2*. European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL): 2011. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu> (accessed March 22, 2012).
- (8) Vollmer, M. K.; Zhou, L. X.; Greally, B. R.; Henne, S.; Yao, B.; Reimann, S.; Stordal, F.; Cunnold, D. M.; Zhang, X. C.; Maione, M.; Zhang, F.; Huang, J.; Simmonds, P. G. Emissions of ozone-depleting halocarbons from China. *Geophys. Res. Lett.* **2009**, 36, L15823, 10.1029/2009gl038659.
- (9) Stohl, A.; Kim, J.; Li, S.; O'Doherty, S.; Mühle, J.; Salameh, P. K.; Saito, T.; Vollmer, M. K.; Wan, D.; Weiss, R. F.; Yao, B.; Yokouchi, Y.; Zhou, L. X. Hydrochlorofluorocarbon and hydrofluorocarbon emissions in East Asia determined by inverse modeling. *Atmos. Chem. Phys.* **2010**, 10 (8), 3545-3560.
- (10) Li, S.; Kim, J.; Kim, K. R.; Mühle, J.; Kim, S. K.; Park, M. K.; Stohl, A.; Kang, D. J.; Arnold, T.; Harth, C. M.; Salameh, P. K.; Weiss, R. F. Emissions of Halogenated Compounds in East

- Asia Determined from Measurements at Jeju Island, Korea. *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45* (13), 5668-5675.
- (11) Kim, J.; Li, S.; Kim, K. R.; Stohl, A.; Mühle, J.; Kim, S. K.; Park, M. K.; Kang, D. J.; Lee, G.; Harth, C. M.; Salameh, P. K.; Weiss, R. F. Regional atmospheric emissions determined from measurements at Jeju Island, Korea: Halogenated compounds from China. *Geophys. Res. Lett.* **2010**, *37* (12), L12801, 10.1029/2010GL043263.
 - (12) Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3: Industrial process and product use*, Japan, 2006.
 - (13) Wang, F.; Zhang, J.; Feng, J.; Liu, D. Estimated historical and future emissions of CFC-11 and CFC-12 in China (in Chinese with English abstract). *Acta Scientiae Circumstantiae* **2010**, *30* (9), 1758-1765.
 - (14) Fang, X.; Thompson, R. L.; Saito, T.; Yokouchi, Y.; Kim, J.; Li, S.; Kim, K. R.; Park, S.; Graziosi, F.; Stohl, A. Sulfur hexafluoride (SF₆) emissions in East Asia determined by inverse modeling. *Atmos. Chem. Phys.* **2014**, *14* (9), 4779-4791.
 - (15) Simmonds, P. G.; Rigby, M.; McCulloch, A.; Vollmer, M. K.; Henne, S.; Mühle, J.; O'Doherty, S.; Manning, A. J.; Krummel, P. B.; Fraser, P. J.; Young, D.; Weiss, R. F.; Salameh, P. K.; Harth, C. M.; Reimann, S.; Trudinger, C. M.; Steele, P.; Wang, R. H. J.; Ivy, D. J.; Prinn, R. G.; Mitrevski, B.; Etheridge, D. M. Recent increases in the atmospheric growth rate and emissions of HFC-23 (CHF₃) and the link to HCFC-22 (CHClF₂) production. **2017**, *2017*, 1-31.
 - (16) Shindell, D.; Faluvegi, G.; Nazarenko, L.; Bowman, K.; Lamarque, J.-F.; Voulgarakis, A.; Schmidt, G. A.; Pechony, O.; Ruedy, R. Attribution of historical ozone forcing to anthropogenic emissions. *Nat. Clim. Change* **2013**, *3*, 567.
 - (17) Ramaswamy, V.; Schwarzkopf, M. D.; Shine, K. P. Radiative forcing of climate from halocarbon-induced global stratospheric ozone loss. *Nature* **1992**, *355* (6363), 810-812.
 - (18) Velders, G. J. M.; Andersen, S. O.; Daniel, J. S.; Fahey, D. W.; McFarland, M. The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2007**, *104* (12), 4814-4819.
 - (19) World Meteorological Organization. *Scientific assessment of ozone depletion: 2010. Global Ozone Research and Monitoring Project — Report No. 52*, Geneva, Switzerland, 2011. http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/SAP/Scientific_Assessment_2010/index.shtml (accessed January 1, 2012).
 - (20) Velders, G. J. M.; Daniel, J. S. Uncertainty analysis of projections of ozone-depleting substances: mixing ratios, EESC, ODPs, and GWPs. *Atmos. Chem. Phys.* **2014**, *14* (6), 2757-2776.
 - (21) Rigby, M.; Prinn, R. G.; O'Doherty, S.; Miller, B. R.; Ivy, D.; Mühle, J.; Harth, C. M.; Salameh, P. K.; Arnold, T.; Weiss, R. F.; Krummel, P. B.; Steele, L. P.; Fraser, P. J.; Young, D.; Simmonds, P. G. Recent and future trends in synthetic greenhouse gas radiative forcing. *Geophys. Res. Lett.* **2014**, *41* (7), 2623-2630.
 - (22) Montzka, S. A.; Dutton, G. S.; Yu, P.; Ray, E.; Portmann, R. W.; Daniel, J. S.; Kuijpers, L.; Hall, B. D.; Mondeel, D.; Siso, C.; Nance, J. D.; Rigby, M.; Manning, A. J.; Hu, L.; Moore, F.; Miller, B. R.; Elkins, J. W. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. **2018**, *557* (7705), 413-417.
 - (23) Fang, X.; Velders, G. J. M.; Ravishankara, A. R.; Molina, M. J.; Hu, J.; Prinn, R. G. Hydrofluorocarbon (HFC) Emissions in China: An Inventory for 2005–2013 and Projections to

2050. *Environ. Sci. Technol.* **2016**, 50 (4), 2027–2034.
- (24) United Nations Environment Programme. *The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC Phase-down*, 2016. http://www.unep.org/ozonaction/Portals/105/documents/7809-e-Factsheet_Kigali_Amendment_to_MP.pdf.
- (25) Le Quéré, C.; Moriarty, R.; Andrew, R. M.; Peters, G. P.; Ciais, P.; Friedlingstein, P.; Jones, S. D.; Sitch, S.; Tans, P.; Arneeth, A.; Boden, T. A.; Bopp, L.; Bozec, Y.; Canadell, J. G.; Chini, L. P.; Chevallier, F.; Cosca, C. E.; Harris, I.; Hoppema, M.; Houghton, R. A.; House, J. I.; Jain, A. K.; Johannessen, T.; Kato, E.; Keeling, R. F.; Kitidis, V.; Klein Goldewijk, K.; Koven, C.; Landa, C. S.; Landschützer, P.; Lenton, A.; Lima, I. D.; Marland, G.; Mathis, J. T.; Metzl, N.; Nojiri, Y.; Olsen, A.; Ono, T.; Peng, S.; Peters, W.; Pfeil, B.; Poulter, B.; Raupach, M. R.; Regnier, P.; Rödenbeck, C.; Saito, S.; Salisbury, J. E.; Schuster, U.; Schwinger, J.; Séférian, R.; Segschneider, J.; Steinhoff, T.; Stocker, B. D.; Sutton, A. J.; Takahashi, T.; Tilbrook, B.; van der Werf, G. R.; Viovy, N.; Wang, Y. P.; Wanninkhof, R.; Wiltshire, A.; Zeng, N. Global carbon budget 2014. *Earth Syst. Sci. Data* **2015**, 7 (1), 47-85.
- (26) Liu, Z.; Guan, D.; Wei, W.; Davis, S. J.; Ciais, P.; Bai, J.; Peng, S.; Zhang, Q.; Hubacek, K.; Marland, G.; Andres, R. J.; Crawford-Brown, D.; Lin, J.; Zhao, H.; Hong, C.; Boden, T. A.; Feng, K.; Peters, G. P.; Xi, F.; Liu, J.; Li, Y.; Zhao, Y.; Zeng, N.; He, K. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature* **2015**, 524 (7565), 335-338.
- (27) ECX EUA Futures. <https://www.quandl.com/data/ICE/CZ2014-ECX-EUA-Futures-December-2014-CZ2014>