

News & Highlights

应对气候变化行动——利用卫星监测甲烷排放

Sean O'Neill

Senior Technology Writer

这是气候变化屡破纪录的危机时代，然而2021年的气候变化再次打破纪录。根据美国国家海洋和大气管理局(NOAA) 2022年1月公布的数字[1-2]，大气中甲烷含量的年度净增长已连续两年创下纪录，预计增长值达到17 ppb (1 ppb= 1×10^{-9})。大气中的甲烷浓度达到1909 ppb (图1)，是工业化前水平的2.5倍以上[3]。

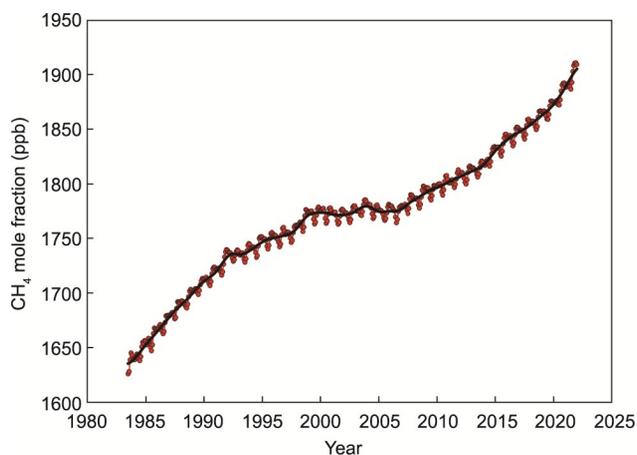


图1. 由美国政府机构NOAA观测记录的1983年以来大气中甲烷的平均丰度(以占大气的十亿分率计)。2022年的记录数值是初始数值。来源: NOAA (经许可)。

二氧化碳是气候变化的主要驱动因素，尽管它在大气中的含量要高出甲烷200倍，但甲烷的全球增温潜势值(GWP)明显更高[4]。事实上，由于甲烷排放会加剧全球变暖，有研究者将它描述为气候“喷灯”[5]。相对地，在100年的时间段内，甲烷的GWP约为二氧化碳的30倍，

但在20年的时间尺度内，甲烷的GWP约为二氧化碳的80倍。不同时间尺度上存在差异，这是由于大部分甲烷会在排放到大气中约十年时间内由平流层中的化学反应消耗掉，而二氧化碳的变暖效应可持续数百年，甚至数千年。

全球变暖研究专家逐渐认识到，在应对气候变化挑战中，甲烷排放是一个不容忽视但能够应对的问题。因此，在一系列的科学、政治和技术力量结合下，人们开始制定并推行相关战略措施，以测量、减缓甚至去除大气中的甲烷排放。其目的不仅是通过减排措施将甲烷排放量维持在地球自然系统所能应对的水平内，也是为了尽可能地减少大气中的甲烷及其“喷灯效应”。

据估计，甲烷对全球变暖的贡献率约为四分之一[6]。每年的甲烷排放量约为580 Mt，其中约有350 Mt是人类活动的结果[7]。虽然全球每年排放的大部分甲烷会通过大气层中以及地球表面较小的化学反应实现快速转化，但每年在大气层中仍有多达50 Mt的甲烷(估值不尽相同)无法通过这些自然过程实现转化[8]。

2021年11月，在英国格拉斯哥举行的第26届缔约方大会(COP26)气候峰会上，美国、欧洲和其他国家共同宣布了《全球甲烷承诺》，甲烷减排的重要性日益凸显[9]。目前已有110多个国家签署了该承诺，同意在2030年前将全球甲烷排放量在2020年的基础上减少30%，到2050年将全球变暖幅度降低至少0.2 °C。联合国政府间气候变化专门委员会的最新报告(2022年4月4日)也呼吁大家朝着同样的目标努力[10]。

“该承诺的宣布促成了‘甲烷时刻’，瞬间引发全球关注。”美国环保协会（总部位于美国纽约）的高级气候学家 Ilissa Ocko 说。“目前在对待甲烷问题上，大家的态度都十分认真，与二氧化碳问题分开讨论。它将成为全球关注的重点问题，这一点很棒。”然而，中国、印度、美国 and 俄罗斯，作为世界上四个最大的甲烷排放国（图2），其中只有美国签署了该承诺协议[11]。

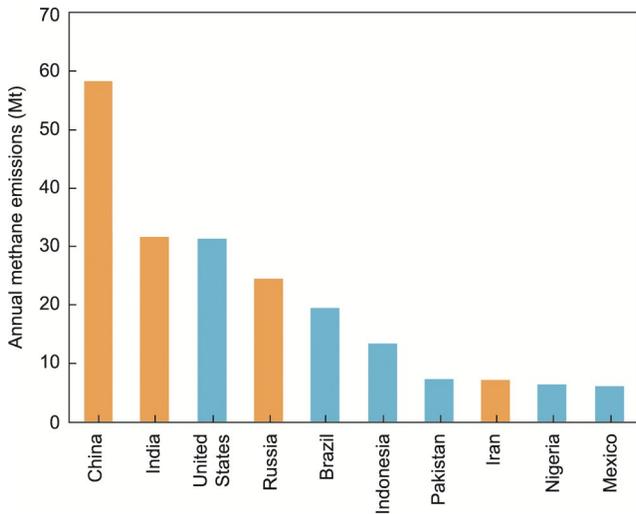


图2. 选定国家的年度甲烷排放量。蓝色显示的是《全球甲烷承诺》的签署国，橙色显示的是未签署该承诺的国家。来源：国际能源署（经许可）。

Ocko 及其同事在一项研究中发现，人们可利用一系列行业现有技术，实现全球甲烷排放量减半[12]。此外，也可采取措施防止天然气（主要成分是甲烷）泄漏，减排的同时增加天然气收益（图3）[12]，在净零成本的情况下削减约四分之一的全球甲烷排放量。将天然气作为燃料燃烧确实会产生二氧化碳，但这比直接向大气中释放甲烷要好，因为甲烷是一种强大的温室气体。

据估计，全球甲烷排放总量的30%~40%源于农业，主要来自饲养牲畜（其消化过程释放甲烷）、粪便处理和水稻耕作[7,13]。而且，随着中等收入国家肉类消费的快速增长[14]，农业甲烷排放量也在上升[3]。据估计，源于油气生产的甲烷排放量占全球甲烷排放总量的20%~25% [7,15]。

试验表明，饲料添加剂能有效遏制牲畜产生的甲烷排放。在最近的一项研究中，研究人员将一种名为紫杉状海门冬 (*Asparagopsis taxiformis*) 的红海藻添加到肉牛的饮食中，发现可减少80%以上的甲烷排放[16]；其他研究者将一种名为刺海门冬 (*Asparagopsis armata*) 的海藻添加到乳牛的饮食中，发现可减少50%以上的甲烷排放[17]。虽然目前还不清楚生产商是否会使用这种饲料添加剂，但

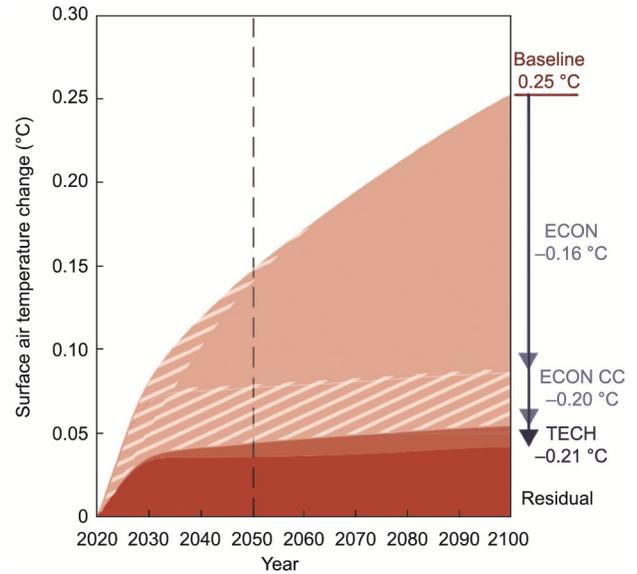


图3. 预计到2100年，石油和天然气行业对全球变暖的贡献为0.25 °C。若采取经济可行的（ECON）净零成本方案（如防止甲烷泄漏），到2100年全球变暖幅度可减少0.16 °C；如果目前公司作出的承诺（ECON CC）得到履行，该幅度可增至0.20 °C。如果石油和天然气行业也采用现有技术（TECH）来避免净零成本选项（ECON CC）外引起的升温，则可以累计避免0.21 °C的增温。来源：《环境研究快报》（CC BY 4.0）。

其商业化进程已经开始。2022年初，加利福尼亚州食品和农业部批准了一种用于乳牛饲料的红海藻添加剂的上市销售[18]。据估计，乳品厂排放的甲烷约占加利福尼亚州甲烷排放量的一半[19]。

根据国际能源署的数据，石油和天然气行业是最受关注的甲烷减排领域，在2000年至2019年期间，该行业的甲烷排放量从62 Mt增加到80 Mt [20]。然而，其他数据来源表明，该排放量数据可能被低估了[7,15]。2021年，由于难以对甲烷排放量的估计值进行核实，联合国环境规划署成立了国际甲烷排放观察组织（International Methane Emissions Observatory）。该组织将收集整理多方来源的排放数据，“以前所未有的精度和粒度经验验证甲烷排放量，实现全球公共记录”，并重点关注能源领域[21]。

要实现该核实验，并使甲烷排放者及时发现甲烷泄漏且承担应有的责任，关键在于要不断提升甲烷监测卫星（携带有用于监测和精确测量甲烷排放的仪器）的可用性和能力。直到最近，用于监测和测量甲烷排放的工具仍限于短期测量飞机、现场传感器网络，或使用低分辨率卫星对大气柱中的甲烷进行稀疏采样与分析[8]。2017年，随着欧洲航天局的“哨兵5号先导”（Sentinel-5 Precursor）卫星搭载对流层监测仪器（TROPOMI）进入轨道，全球甲烷跟踪工作开始得到改善。

TROPOMI的空间分辨率为5.5 km × 7.0 km，对甲烷的灵敏度为5~10 ppb，在近地轨道上每100 min绕地球一

周，在没有云层的情况下，能每天对全球近地表的甲烷浓度进行监测[22]。这使得它能够追踪大浓度甲烷信息，如油气田附近排放的甲烷。2022年2月，由法国圣欧班气候与环境科学实验室大气成分部主任Philippe Ciais参与领导的团队，确定并测量了2019年和2020年全球甲烷排放最严重的领域及其排放量。这项调查捕捉到了1800个大型甲烷排放点，排放速度超过 $20 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

在这些“超级甲烷排放者”中，土库曼斯坦的石油和天然气工业位居榜首，每年释放1.18 Mt的甲烷[8]。由于甲烷可作为商品进行售卖，因此，通过改善相关措施并强化设施设备的方式遏制甲烷泄漏符合超级排放国经济利益[12]。例如，土库曼斯坦如果拦截住了泄漏的甲烷并进行出售，估计可实现约60亿美元的净收益[8]。但是，这些“超级排放者”也只是整体排放问题的一小部分。“尽管这些超级泄漏点十分重要，但它们只占全球化石甲烷排放量的5%左右，不过是冰山一角。”Ciais说。

此外还包括较小的泄漏和非紧急情况下的甲烷排放和燃烧，这些排放数据也即将变得清晰，因为有一批新的卫星计划在2023年发射。美国环保协会的分支机构MethaneSAT计划在2023年初发射一颗同名卫星[23]。该卫星的空间分辨率为 $130 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ ，对甲烷的敏感度约为3 ppb，每3~4天完成一次全球监测，并及时将相关数据免费发布出来。美国碳地图组织（Carbon Mapper）——包括美国国家航空航天局喷气推进实验室、亚利桑那大学等——计划建设由分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的卫星组成的卫星星座，对指定的优先点源进行广泛和精确追踪。首批两颗Carbon Mapper示范卫星计划于2023年发射[24]。

美国华盛顿州西雅图市华盛顿大学大气科学助理教授Alex Turner说：“甲烷卫星将把我们带到甲烷排放设施的水平。通过卫星来研究甲烷来源是很棘手的，因为你看到的是卫星下方的总气柱，这可能是由许多不同的空间模式形成的。这就好比通过测量河流的深度来计算上游哪里下过雨一样。”

多卫星监测使准确定位排放点的任务变得简单（图4）。例如，通过将TROPOMI的监测数据与更具针对性的高分辨率卫星数据相结合，包括温室气体卫星-演示器（GHGSat-D；分辨率 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ [25]）和意大利高光谱先导应用卫星（PRISMA；分辨率 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ），准确监测了2019年11月在东得克萨斯州福特页岩地区的气井喷发，该事件持续了20天，泄漏了近5000 t甲烷 [26]。2022年1月，GHGSat-D监测到俄罗斯中南部的一个地下煤矿泄漏，其甲烷排放速度为 $87 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ ，这是GHGSat-D网络迄今发现的最大的泄漏事故[27]。

鉴于石油和天然气工业不愿意进行改变，在未来几十年里，也可能出现直接从大气中清除甲烷的“负排放技术”，其灵感来自二氧化碳直接空气捕集（DAC）这一新兴技术[28]。捕集到的二氧化碳将被埋在地下深处的地质构造中或被转化为燃料，而捕集的甲烷，则可用于出售或氧化为二氧化碳（和水）。

氧化甲烷的反应在热力学上是很有利的，有几种类型的材料在捕集甲烷方面显示出潜力，如嵌入金属催化剂的纳米多孔沸石[29]。“科学家们已经筛选出近10万种沸石矿物作为潜在的甲烷浓缩剂。”美国加利福尼亚州斯坦福大学地球系统科学教授Rob Jackson在剑桥大学2021年

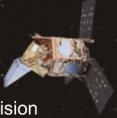
A comparison of methane satellites		
Global mapping	Area mapping	Location mapping
7000 m × 5500 m pixels across 2600 km swath	130 m × 400 m pixels across > 200 km swath	30 m × 30 m pixels across > 10 km swath
<ul style="list-style-type: none"> Global and large-scale regions Large point sources 	<ul style="list-style-type: none"> Area sources Point sources Sector-wide qualification 	Point sources
<p>TROPOMI* SCIAMACHY GOSAT</p>  <ul style="list-style-type: none"> Moderate precision Global mapping Quantify large-scale regions Quantify large-point sources Guidance from other satellites to interpret point-source emissions 	<p>MethaneSAT*</p>  <ul style="list-style-type: none"> High precision Detect and quantify area sources Sector-wide quantification Detect and quantify high-emitting point sources Fills observing and data gaps between location and global mapping missions 	<p>GHGSat* Carbon Mapper PRISMA</p>  <ul style="list-style-type: none"> Low precision Detect and quantify moderately high-emitting point sources Guidance from other satellites to inform target acquisition

图4. 在轨和即将发射的甲烷探测卫星能力比较图。MethaneSAT和首批两颗Carbon Mapper卫星预计将于2023年进入轨道。SCIAMACHY：大气制图用扫描成像吸收光谱仪；GOSAT：温室气体观测卫星；GHGSat-D：温室气体卫星-演示器；PRISMA：意大利高光谱先导应用卫星。来源：MethaneSAT（经许可）。

9月举行的“甲烷去除和新兴技术”在线会议上发言说[30]。

大气中甲烷的低浓度可能意味着在甲烷去除过程中需要风机来增加空气流通或空气压力，其成本可能会令人望而却步。Jackson说：“我认为混合系统可以提供一个好的折中方案：在相同的基础设施中，可将DAC用于二氧化碳去除和甲烷氧化。你只需支付一次移动空气的费用，就能从空气中去除不止一种温室气体。”

Ciais认为DAC还有一个好处。他说：“原则上，如果这种技术可以被安全地大规模推广，那么我们可以将大气中的甲烷浓度减少到低于工业化前的水平，从而产生一个很好的冷却效果，以抵消二氧化碳引起的部分升温。”

与许多地球工程计划一样，目前仍不清楚哪些甲烷去除技术（如果有的话）具有大规模商业化应用的可行性[3]。而且，由于只要有足够的减排，甲烷就能有效地自我清除，因此一些人认为减排措施已经足够了。正如美国亚利桑那州坦佩市亚利桑那州立大学的DAC先驱和负碳排放中心主任Klaus Lackner教授所说[31]，“如果一个排水口大开的浴缸里的水位在上升，关掉水龙头可能是一个比放水更好的策略。”

显然，专家们希望通过减少甲烷排放，快速改善气候变化，这不仅是因为甲烷是一种强大的温室气体，还因为它的清除会激发出一个正反馈过程。Turner说：“如果甲烷浓度上升，在大气中氧化甲烷的分子——羟基自由基（·OH）——就会减少，那么剩余的甲烷在大气中停留的时间会更长。相反，如果我们减少甲烷排放，周围就会有更多的羟基自由基，可以更快地消耗剩余的甲烷。”

Turner和他的同事表示，2020年全球甲烷排放浓度达到创纪录的最大年度增幅，其中80%的增长由大气化学反应导致，另一个全球性因素是2019年新型冠状病毒肺炎疫情。疫情的封锁使包括氮氧化物（NO_x）的交通污染性排放大量减少。但是大气中的氮氧化物会促进·OH的产生，所以它的减少也意味着更少的·OH，这反过来可能减缓了甲烷的氧化，使甲烷更快地在大气中积聚[32]。

Ciais表示：“但是，大气中的甲烷不仅仅源自人类活动。自2006年以来，甲烷一半的增长源于湿地排放——包括亚马孙地区，可能也有北极和非洲地区的湿地排放。因此，即使我们减少了人为排放，甲烷排放量仍可能增加。”但随着卫星对这一气候“喷灯”的追踪能力不断增强，甲烷在全球变暖中所扮演的角色会越来越清晰。

References

- [1] Trends in atmospheric methane—global CH₄ monthly means [Internet]. Silver Spring: National Oceanic and Atmospheric Administration; [cited 2022 May 12]. Available from: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/.
- [2] Tolleson J. Scientists raise alarm over “dangerously fast” growth in atmospheric methane [Internet]. London: Nature; 2022 Feb 8 [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-00312-2>.
- [3] Jackson RB, Abernethy S, Canadell JG, Cargnello M, Davis SJ, Féron S, et al. Atmospheric methane removal: a research agenda. *Philos Trans Royal Soc A* 2021;379(2210):20200454.
- [4] Understanding global warming potentials [Internet]. Washington, DC: Environmental Protection Agency; [updated 2022 May 5; cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understandingglobal-warming-potentials>.
- [5] Milman O. Methane in Earth’s atmosphere rose by record amount last year, US government data shows [Internet]. London: The Guardian; 2022 Apr 8 [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.theguardian.com/environment/2022/apr/08/methane-earth-atmosphere-record-high-usa-government-data>.
- [6] Turner AJ, Frankenberg C, Kort EA. Interpreting contemporary trends in atmospheric methane. *Proc Natl Acad Sci USA* 2019;116(8):2805–13.
- [7] Sauniois M, Stavert AR, Poulter B, Bousquet P, Canadell JG, Jackson RB, et al. The global methane budget 2000–2017. *Earth Syst Sci Data* 2020;12(3):1561–623.
- [8] Lauvaux T, Giron C, Mazzolini M, d’Aspremont A, Duren R, Cusworth D, et al. Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science* 2022;375(6580):557–61.
- [9] Launch by United States, the European Union, and partners of the Global Methane Pledge to keep 1.5 °C with reach [Internet]. Brussels: European Commission; 2021 Nov 2 [cited 2022 May 12]. Available from: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_21_5766.
- [10] The evidence is clear: the time for action is now. We can halve emissions by 2030 [Internet]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2022 Apr 4 [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.ipcc.ch/2022/04/04/ipcc-ar6-wgiii-pressrelease/>.
- [11] Top ten emitters of methane, 2021—charts, data & statistics [Internet]. Paris: International Energy Agency; [updated 2022 Feb 22; cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/top-tenemitters-of-methane-2021>.
- [12] Ocko IB, Sun T, Shindell D, Oppenheimer M, Hristov AN, Pacala SW, et al. Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environ Res Lett* 2021;16(5):054042.
- [13] Chang J, Peng S, Yin Y, Ciais P, Havlik P, Herrero M. The key role of production efficiency changes in livestock methane emission mitigation. *AGU Adv* 2021;2(2):e2021AV000391.
- [14] Godfray HCl, Aveyard P, Garnett T, Hall JW, Key TJ, Lorimer J, et al. Meat consumption, health, and the environment. *Science* 2018;361(6399):eaam5324.
- [15] Massive methane emissions by oil and gas industry detected from space [Internet]. Rockville: ScienceDaily; 2022 Feb 3 [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.sciencedaily.com/releases/2022/02/220203161130.htm>.
- [16] Roque BM, Venegas M, Kinley RD, de Nys R, Duarte TL, Yang X, et al. Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS ONE* 2021;16(3):e0247820.
- [17] Roque BM, Salwen JK, Kinley R, Kebreab E. Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows’ diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. *J Clean Prod* 2019;234:132–8.
- [18] Duggan T. To fight climate change, California approves seaweed that cuts methane emissions in cow burps [Internet]. San Francisco: San Francisco Chronicle; [updated 2022 May 9; cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.sfchronicle.com/climate/article/To-fight-climate-change-Californiaapproves-17155443.php>.
- [19] Marklein AR, Meyer D, Fischer ML, Jeong S, Rafiq T, Carr M, et al. Facility-scale inventory of dairy methane emissions in California: implications for mitigation. *Earth Syst Sci Data* 2021;13(3):1151–66.
- [20] trackerMethane 2021—analysis [Internet]. Paris: International Energy Agency; 2021 Jan [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2021>.
- [21] Methane [Internet]. Nairobi: UN Environment Programme; [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.unep.org/explore-topics/energy/what-wedo/>

- methane.
- [22] Hu H, Landgraf J, Detmers R, Borsdorff T, Aan de Brugh J, Aben I, et al. Toward global mapping of methane with TROPOMI: first results and intersatellite comparison to GOSAT. *Geophys Res Lett* 2018;45(8):3682–9.
- [23] Timperley J. How satellites may hold the key to the methane crisis [Internet]. London: The Guardian; 2022 Mar 6 [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.theguardian.com/environment/2022/mar/06/how-satellites-mayhold-the-key-to-the-methane-crisis>.
- [24] Technology [Internet]. Pasadena: Carbon Mapper; c2022 [cited 2022 May 12]. Available from: <https://carbonmapper.org/our-mission/technology/>.
- [25] The GHGSat-D imaging spectrometer [Internet]. Montreal: GHGSat; [cited 2022 May 12]. Available from: <https://www.ghgsat.com/en/scientificpublications/the-ghgsat-d-imaging-spectrometer/>.
- [26] Cusworth DH, Duren RM, Thorpe AK, Pandey S, Maasackers JD, Aben I, et al. Multisatellite imaging of a gas well blowout enables quantification of total methane emissions. *Geophys Res Lett* 2021;48(2). e2020GL090864.
- [27] Fountain H. One site, 95 tons of methane an hour [Internet]. New York City: The New York Times; 2022 Jun 14 [cited 2022 Jun 23]. Available from <https://www.nytimes.com/2022/06/14/climate/methane-emissions-russia-coal-mine.html>.
- [28] O’Neill S. Direct air carbon capture takes baby steps—giant strides are needed. *Engineering* 2022;8:3–5.
- [29] Jackson RB, Solomon EI, Canadell JG, Cargnello M, Field CB. Methane removal and atmospheric restoration. *Nat Sustain* 2019;2(6):436–8.
- [30] ActionMethane. Rob Jackson at methane removal and emerging technologies, 28 September 2021 [Internet]. San Bruno: YouTube; 2021 Oct 19 [cited 2022 May 12]. Available from: <https://youtu.be/wBuWyEiogWo>.
- [31] Lackner KS. Practical constraints on atmospheric methane removal. *Nat Sustain* 2020;3(5):357.
- [32] Laughner JL, Neu JL, Schimel D, Wennberg PO, Barsanti K, Bowman K, et al. Societal shifts due to COVID-19 reveal large-scale complexities and feedbacks between atmospheric chemistry and climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 2021;118(46):e2109481118.