

12-20-2023

Atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observation: A novel method to evaluate carbon emissions

Zhenchuan NIU

State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China Xi'an Accelerator Mass Spectrometry Center, Xi'an 710061, China, niuzc@ieecas.cn

See next page for additional authors

Recommended Citation

NIU, Zhenchuan; WANG, Peng; WU, Shugang; and ZHOU, Weijian (2023) "Atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observation: A novel method to evaluate carbon emissions," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 38 : Iss. 12 , Article 15.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20230923004>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol38/iss12/15>

This Environmental Protection and Ecological Restoration is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.

Atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observation: A novel method to evaluate carbon emissions

Abstract

As an important carbon emitter, China faces the stress of carbon peaking and carbon neutrality goals and international carbon reduction duty. The accurate data of carbon emissions are important to evaluate the carbon peaking and carbon neutrality goals and fulfill the international duty of carbon reduction. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report recommends the combination of top-down atmospheric CO_2 observation with atmospheric inversion to verify the bottom-up inventory of carbon emissions, and the atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observation can make the verification more accurate. Radiocarbon (^{14}C) is the most precise tracer of fossil fuel CO_2 and is widely recommended by the international community to evaluate the carbon emissions. Based on the international developing trends and the situation in China for atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observation, this study suggests to establish the atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observation network as soon as possible, with more supporting; to conduct training to unify the standard, and to participate in international exchanges; and to combine the $^{14}\text{CO}_2$ observation with atmospheric inversion to obtain the carbon emissions. The purpose of the $^{14}\text{CO}_2$ observation is to make the research level of Chinese carbon emissions in line with the international standards, to improve the reliability of carbon emission data in China, and then to serve the carbon peaking and carbon neutrality goals and climate diplomacy negotiations.

Keywords

radiocarbon, fossil fuel CO_2 carbon emissions, carbon peaking, carbon neutrality, new method

Authors

Zhenchuan NIU, Peng WANG, Shugang WU, and Weijian ZHOU

引用格式: 牛振川, 王鹏, 吴书刚, 等. 大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测: 碳排放评估的新方法. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1866-1873, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230923004.

Niu Z C, Wang P, Wu S G, et al. Atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observation: A novel method to evaluate carbon emissions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1866-1873, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230923004. (in Chinese)

大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测: 碳排放评估的新方法

牛振川 王鹏 吴书刚 周卫健*

1 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室 西安 710061

2 西安加速器质谱中心 西安 710061

摘要 我国作为碳排放大国, 面临着碳达峰、碳中和 (以下简称“双碳”) 目标任务和国际碳减排压力。因此, 准确的碳排放数据对于评估“双碳”目标和国际履约非常重要。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 报告推荐将二氧化碳 (CO_2) 观测与大气反演结合来“自上而下”地校验“自下而上”的碳排放清单, 并指出加入大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测可以更准确地校验碳排放清单。放射性碳同位素 (^{14}C) 是化石源 CO_2 最准确的示踪剂, 已被国际社会广泛推荐用于碳排放评估。文章基于大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测的国际发展趋势和国内的紧迫状况, 建议加大支持力度, 建立大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测网络; 开展培训, 统一相关标准, 积极参与国际交流; 尽快开展 $^{14}\text{CO}_2$ 观测与大气反演相结合的研究。以此使我国的碳排放研究水平与国际接轨, 并提高碳排放数据的可靠性, 进而服务国家的“双碳”目标和气候外交谈判。

关键词 放射性碳同位素, 化石源二氧化碳, 碳排放, 碳达峰、碳中和, 新方法

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20230923004

CSTR 32128.14.CASbulletin.20230923004

南极冰芯的记录显示, 过去 80 万年以来大气二氧化碳 (CO_2) 浓度与温度同步变化^[1]。近代工业革命以来, 大气 CO_2 浓度由之前的 280 ppm^① 增长到 2022 年

的约 417 ppm^[2], 同期地表平均温度增长了约 1.1°C^[3]。由此, 国际社会普遍认为全球变暖是由于 CO_2 等温室气体的排放造成的, 并达成了减少温室气体排放以控

*通信作者

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA23010302), 国家自然科学基金项目 (42330114、42173082)

修改稿收到日期: 2023 年 11 月 27 日

① ppm 指干空气中每百万 (10^6) 个气体分子所含的该种气体分子数。

制全球升温的共识。《巴黎协定》达成如下协议：全球温度增长不超过2℃并尽可能保持在1.5℃，到2050年大气CO₂浓度控制在450 ppm以内；各国以“自主贡献”的方式参与全球应对气候变化行动。碳排放权即生存权和发展权，我国作为碳排放大国，面临碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”）目标任务和国际减排压力。因此，准确及时的碳排放数据对于评估和保障“双碳”目标和国际履约的实现非常重要。

1 碳排放评估的主要方法

1.1 “自下而上”的源清单法

目前，各国碳排放的评估主要依赖于“自下而上”的源清单法，即通过各种化石能源的消耗量乘以相应的排放因子得到碳排放总量，这也是目前比较普遍和简单的方法。然而，由此方法得到的碳排放量有不确定性（3%—15%）^[4,5]，这跟各种燃料的排放因子和能源消耗量的不确定性有关，尤其是燃煤的排放因子，因煤种的不同而变化较大。例如，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）推荐不同煤种的碳排放因子^②为0.322—0.711，有研究实测我国燃煤新的碳排放因子平均为0.499，使用此新排放因子计算则表明我国2000—2012年累积的碳排放量会被高估约29亿吨碳^[6]，这比我国陆地的碳汇总量还要高，这种较大的不确定性非常不利于我国碳排放数据的准确评估和国际履约。化石燃料消耗量的不确定性主要跟统计时有意和无意的误差有关，并且在城市尺度上的碳排放数据不确定性更大（50%—200%）^[7]，这跟城市统计资料的不全面和统计边界难以界定有关。

1.2 “自上而下”的观测与反演法

《巴黎协定》还建议利用可监测、可报告、可核查的“三可”（MRV）方法体系，来监测能源和化石燃料密集型国家的碳排放变化。IPCC在最新修订的温

室气体清单指南中，专门增加了校验碳排放清单的方法，即基于大气CO₂浓度观测来“自上而下”地反演碳排放量；并指出大气中含放射性碳同位素的二氧化碳（¹⁴CO₂）观测的加入可进一步提高仅基于大气CO₂浓度反演结果的准确性，进而更准确地校验碳排放清单^[8]。这种基于大气CO₂浓度观测的反演是对“自下而上”源清单法的重要补充，可以独立地校验碳排放清单，提高国家碳排放数据的可靠性。

大气反演方法首先需要高精度的大气CO₂浓度信息。通常，大气CO₂浓度由地面站点观测得到，其观测的数据精度高（0.1 ppm）、时间连续，可定点长期观测；但站点有限且仅代表地面的观测结果。近年来，随着卫星遥感技术的发展，碳卫星可以提供大范围的CO₂柱浓度信息，但观测易受到轨道、云层和气溶胶等因素的干扰，且精度低于地基观测^[9,10]。无论是地面站点还是卫星遥感，其观测值都是不同排放源混合的结果，并未识别来自化石源的贡献量，这会使反演的碳排放量难以验证。

为什么大气¹⁴CO₂观测可以提高反演碳排放数据的准确性呢？这是因为常规的大气反演使用的是大气CO₂总浓度，并未使用来自化石源（占人为源的主要部分）贡献量的CO₂（CO_{2ff}），由此反演的碳排放量无法与清单中的碳排放量（主要来自人为源）准确匹配。放射性碳同位素（¹⁴C）是CO_{2ff}最准确的示踪剂，其准确性大幅优于CO和NO₂等间接示踪剂。¹⁴C的半衰期为5730年，远小于化石燃料的形成时间，因而化石燃料中的¹⁴C早已衰变耗竭，即化石燃料燃烧形成的CO₂中不含¹⁴C；而生物源CO₂（CO_{2bio}）中的¹⁴C水平与现代大气¹⁴C水平相接近；CO_{2ff}和CO_{2bio}的Δ¹⁴C值差异约可达100%。碳同位素值在不同源之间的巨大差异使¹⁴C成为分辨CO_{2ff}最准确的工具。通过观测大气¹⁴CO₂值，可以定量获得大气CO_{2ff}浓度，进

② 文中煤的碳排放因子指的是每吨煤燃烧产生的碳排放量(吨碳/吨煤)。

而用于直接验证由人为源清单反演得到 $\text{CO}_{2\text{ff}}$ 浓度，并降低反演碳排放量的不确定性。当然，大气 $^{14}\text{CO}_2$ 作为一种新的观测指标，也存在技术门槛高、精度要求高（ $\leq 0.2\%$ ）和不能在线测量的问题。 ^{14}C 在自然界中的含量极低，约占碳元素的 1.2×10^{-12} ，需要专门的、昂贵的加速器质谱仪才能进行高精度（ 0.2% ）的测量。

总体而言，不同的碳排放评估方法各有优势和不足（表1）。目前，应在已有的 CO_2 浓度观测的基础上，尽快加入大气 $^{14}\text{CO}_2$ 这个新的观测指标，“自上而下”地反演碳排放量，从而验证碳排放清单，以此提高国家碳排放数据的可靠性。

2 大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测的国际趋势与动态

2.1 大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测的起源和发展

西方国家早在20世纪50年代就开始了大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测，观测的最初目的是研究大气层核武器试验的影响。最早的大气 $^{14}\text{CO}_2$ 长期观测于1954年在新西兰惠灵顿地区开始^[11]，随后世界上的许多站点都开始了大气 $^{14}\text{CO}_2$ 的长期观测。观测结果表明，由于大气层核试验的影响使得大气 $^{14}\text{CO}_2$ 水平急剧增加，到1964年达到峰值；由于1963年《部分禁止核试验条约》的签订，大气 $^{14}\text{CO}_2$ 在与海洋和陆地植被等碳库的交换过

程中，开始急剧下降。到20世纪80年代末和90年代初，核爆的影响已经较小；欧洲开始利用大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测来示踪城市大气 $\text{CO}_{2\text{ff}}$ 的变化状况。随后，大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测被广泛应用于欧美等国家的 $\text{CO}_{2\text{ff}}$ 示踪研究^[12-15]。

2.2 大气 $^{14}\text{CO}_2$ 评估碳排放清单的国际案例

国际科学界的研究案例表明，大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测结合模式可以用于评估碳排放清单，并降低清单的不确定性。点源碳排放量的不确定性通常较大（约20%），而结合了 ^{14}C 的大气模拟可以将美国火电厂碳排放量的不确定性降低到10%左右^[15]。对于国家尺度， ^{14}C 示踪获得的大气 $\text{CO}_{2\text{ff}}$ 数据越多，越能准确地反演碳排放量。由1000多个大气 $\text{CO}_{2\text{ff}}$ 数据结合反演模型得到的美国月度碳排放量的不确定性为5%；当大气 ^{14}C 数据增加到5000个时，不确定性会降低到约3%。由大气 $^{14}\text{CO}_2$ 和 CO_2 数据结合反演模型得到的美国2010年的碳排放量为 $1\,653 \pm 30 \text{ Tg C} \cdot \text{yr}^{-1}$ ，其不确定性低于2%^[16,17]。

2.3 国际组织对大气 $^{14}\text{CO}_2$ 观测的认可和推荐

由于 ^{14}C 能够准确定量大气 CO_2 中来自化石源的贡献量， ^{14}C 示踪被国际社会认为是目前能独立、客观地评价碳排放的方法，获得了广泛的认可和推荐。美国国家科学院（NAS）在2010年和2022年发表的报告

表1 不同碳排放评估方法的优势与不足

Table 1 Advantage and disadvantage of different methods of evaluating carbon emissions

评估方法	优势	不足
“自下而上”的源清单法	应用范围广，简单易推广；能得到不同部门和行业的碳排放量及历史碳排放量	数据的不确定性随时空分辨率提高而增大；时空分辨率一般较低，难以捕捉排放源的动态变化
“自上而下”的大气反演中不同观测手段	二氧化碳(CO_2)浓度地基观测	技术成熟，可在线连续观测大气 CO_2 浓度，且精度高(0.1 ppm)，观测成本相对较低
	CO_2 浓度卫星遥感	观测结果代表不同源—汇的混合值，不能反映特定碳源的贡献量；空间覆盖范围有限
	$^{14}\text{CO}_2$ 观测	观测覆盖范围广，空间连续性强，可重复观测，能提供统一观测模式的柱浓度信息
		需反演成 CO_2 数据，比地基观测数据精度低；成本较高；易受轨道、云层和气溶胶等因素干扰；不能反映不同源的贡献量
		能够准确区分大气 CO_2 中人为源和生物源的贡献量，为碳排放量的反演提供准确验证
		成本较高，较高的精度要求(0.2%)使其无法在线，且需专门的昂贵的分析仪器；观测网络覆盖不足

中建议, 扩展大气¹⁴C_{2ff}的观测站点以获取足够多的数据来提高对碳排放清单的核验能力^[18,19]。世界气象组织(WMO)在2019年发布的全球温室气体公报中, 将¹⁴C示踪大气CO_{2ff}列为目前评估碳排放的主要手段, 建议参与全球大气观测计划(GAW)的实验室应同时开展大气CO₂和¹⁴C_{2ff}的观测^[20]。IPCC将大气¹⁴C_{2ff}观测写入最新修订的温室气体清单指南中^[8], 指出大气¹⁴C_{2ff}观测会提高基于CO₂浓度的大气反演结果的准确性, 进而更准确地评估碳排放清单。

3 大气¹⁴C_{2ff}观测的国内现状与不足

3.1 我国碳监测的紧迫性与现状

我国的碳排放约占世界的1/3, 亟须大力开展碳监测示踪与反演研究。自1989年开始, 我国陆续在青海省的瓦里关、北京市的上甸子村、浙江省的临安区和黑龙江省的龙凤山等地开展了大气CO₂浓度的长期观测^[21,22], 一些研究也对东亚地区的大气CO₂柱浓度进行了反演^[23]。但我国当前的CO₂监测与反演以总浓度为主, 大多数未区分来自化石源和生物源的贡献量, 这不利于我国碳排放量的准确评估和气候外交谈判。目前, 大气¹⁴C_{2ff}观测的重要性已引起我国相关部门的关注。生态环境部在2021年9月颁布的《碳监测评估试点工作方案》中, 要求一些试点城市开展大气¹⁴C_{2ff}监测。

3.2 我国大气¹⁴C_{2ff}观测的进展

与国外相比, 我国对大气¹⁴C_{2ff}的观测研究起步较晚。直到2010年, 国内才开始利用¹⁴C_{2ff}观测来示踪大气CO_{2ff}^[24]。国内团队对我国大气¹⁴C_{2ff}的本底值及其与碳排放量的关系, 城市大气CO_{2ff}的浓度水平、变化特征、来源和传输及与细颗粒物(PM_{2.5})的关系等进行了系统研究(表2), 取得了3项主要进展^[25-31]。

(1) 建立了不同时间尺度的大气¹⁴C_{2ff}样品采集方法, 实现样品¹⁴C的高精度测量; 获得我国大气¹⁴C_{2ff}的本底值, 改变依赖国外本底值的状况。开展碳排放

的¹⁴C示踪研究, 首先需要建立可靠的样品采集和分析方法, 国内目前已经建立了从年到小时不同时间尺度的大气¹⁴C样品采集方法, 且样品石墨化后, 经加速器质谱仪测定, 精度优于0.2%。大气¹⁴C_{2ff}的本底值是示踪CO_{2ff}的基础, 我国由于起步较晚, 还缺乏大气¹⁴C_{2ff}本底值的观测, 需要依赖国外本底值。国内团队通过在青海省瓦里关、海南省七仙岭和陕西省太白山等地的观测, 并与国外本底值进行比较, 确立了我国大气¹⁴C_{2ff}的本底值, 并揭示了其变化规律, 改变了依赖国外本底值的状况, 进而可以及时准确地示踪我国的CO_{2ff}。

(2) 定量了我国主要城市大气CO_{2ff}浓度水平、揭示其时空变化特征和影响因素。通过在我国主要城市的大气¹⁴C_{2ff}观测, 发现城市新增大气CO₂主要来自化石源排放。时间上, 城市大气CO_{2ff}具有冬季高于夏季、日变化呈双峰的特征, 且工作日和非工作日的CO_{2ff}差异不显著, 这与欧美城市不同。空间上, 城市大气CO_{2ff}具有城区高于郊区、CO_{2ff}由关中盆地中心向盆地周边递减和我国西北部城市冬季大气CO_{2ff}较高的特征。此外, 对西安市大气¹⁴C_{2ff}的多年观测表明, 西安市大气CO_{2ff}浓度由2011—2013年的40.1±3.8 ppm下降到2014—2016年的25.7±1.1 ppm, 而同期PM_{2.5}浓度由123.5±9.5 μg·m⁻³下降到69.6±8.4 μg·m⁻³, 说明自2013年9月以来实施的“大气十条”, 促使了大气污染物与CO_{2ff}浓度的双下降。

(3) 解析了典型城市CO_{2ff}的来源和传输的影响, 发现与PM_{2.5}的同步变化关系。国内团队结合¹³C同位素, 解析出西安市冬季CO_{2ff}主要来自燃煤(54%—70%), 而北京市冬季CO_{2ff}主要来自天然气燃烧(55%±9%)。区域气象—大气化学在线耦合模式(WRF—Chem)模拟结果表明, 西安市CO_{2ff}主要来自关中盆地内排放, 而北京市CO_{2ff}会受到东南风输入的较大影响(约30%)。研究发现我国城市的CO_{2ff}浓度与PM_{2.5}浓度普遍相关, 灰霾期间CO_{2ff}浓度显著升高,

表2 中国大气¹⁴CO₂的研究状况
Table 2 Research status of atmospheric ¹⁴CO₂ in China

研究点类型	研究点名称	样品类型	研究内容
城市	北京、西安	大气、一年生植物和树轮样品	¹⁴ CO ₂ 年际、季节、月和日变化,空间分布,传输与来源
	厦门	大气样品	¹⁴ CO ₂ 月变化,日变化
	上海、广州、沈阳、哈尔滨、乌鲁木齐、兰州、西宁、呼和浩特、石家庄、青岛、武汉、重庆、贵阳、拉萨、漠河、保亭	大气样品	¹⁴ CO ₂ 年际、季节变化
本底	七仙岭、太白山	大气样品	¹⁴ CO ₂ 年际、季节变化
	瓦里关、上甸子、临安、长白山、鹿回头	大气样品	¹⁴ CO ₂ 年际、季节和月变化

CO_{2ff}与PM_{2.5}两者的浓度同时变化,这可服务于我国当前减污降碳协同增效方案的实施。

3.3 我国大气¹⁴CO₂观测的不足

我国在大气¹⁴CO₂观测方面已取得了一些进展,通过¹⁴C示踪法得到了大气CO_{2ff}浓度水平,但由于与源清单法得到的碳排放量(单位为吨)量纲不同,故还不能直接对比。国内有团队结合CO₂观测和大气反演,研究了太原—晋中地区的碳排放量^[32],但其反演中的先验清单还未经¹⁴C示踪校验。总体而言,我国在¹⁴CO₂观测结合大气反演来定量碳排放量方面的研究还是空白。此外,碳汇量的反演首先需要准确的化石碳排放量。因此,有必要构建一种“¹⁴CO₂—CO₂”双示踪剂反演系统,相较于仅考虑CO₂的传统反演系统,双示踪剂反演系统能有效降低同化过程中因区分CO_{2ff}与CO_{2bio}不准确所产生的误差,从而进行我国更为精准的碳排放量反演。

4 建议

基于当前碳减排的国际形势和国际的研究前沿,大气¹⁴CO₂观测是我国“双碳”领域一项非常重要且迫在眉睫的工作,对此提出如下4点建议。

(1) 我国幅员辽阔而大气¹⁴CO₂的观测数据又比

较缺乏。建议尽快结合大气反演的需求,最大限度地在我国建立涵盖不同类型地点的大气¹⁴CO₂观测网络,全面揭示我国大气CO₂中来自化石排放源和生物排放源的贡献量,展现我国CO_{2ff}和CO_{2bio}的分布图景,为大气反演等研究提供关键基础数据。

(2) 大气¹⁴CO₂观测专业性强,精度要求较高(≤0.2%),因此,应统一开展相关培训,并统一大气¹⁴CO₂观测标准和测量方法。定期组织国内比对,积极参与国际比对;定期与国外本底大气¹⁴CO₂的观测数据对比;积极与国际同行交流最新经验和成果,扩大我国在此领域的影响力。

(3) ¹⁴C测试成本较高,且目前大气¹⁴CO₂还不能在线观测;但这是一项长期的工作,需要各级政府和相关研究机构加大支持力度。建议将大气¹⁴CO₂观测逐步纳入温室气体监测业务中,由相关科研院所牵头制定统一的技术标准,规范大气¹⁴CO₂样品采集、测量和质控等,并在研究上给予技术支持,由地方政府在采样点布设、样品采集、人员和经费等方面给予支持。

(4) 尽快将¹⁴CO₂观测与大气反演相结合,开展全国和区域的碳排放量反演,进而校验清单碳排放量,提高我国碳排放数据的可靠性。

参考文献

- 1 Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 2008, 453(7193): 379-382.
- 2 Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data*, 2022, 14(11): 4811-4900.
- 3 IPCC. IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. [2023-12-15]. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle>.
- 4 Marland G, Hamal K, Jonas M. How uncertain are estimates of CO₂ emissions?. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(1): 4-7.
- 5 Ballantyne A P, Andres R, Houghton R, et al. Audit of the global carbon budget: Estimate errors and their impact on uptake uncertainty. *Biogeosciences*, 2015, 12(8): 2565-2584.
- 6 Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature*, 2015, 524: 335-338.
- 7 Gately C K, Hutyra L R. Large uncertainties in urban-scale carbon emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(11): 242-260.
- 8 IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC, 2019.
- 9 刘毅, 王婧, 车轲, 等. 温室气体的卫星遥感——进展与趋势. *遥感学报*, 2021, 25(1): 53-64.
Liu Y, Wang J, Che K, et al. Satellite remote sensing of greenhouse gases: Progress and trends. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 53-64. (in Chinese)
- 10 刘良云, 陈良富, 刘毅, 等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战. *遥感学报*, 2022, 26(2): 243-267.
Liu L Y, Chen L F, Liu Y, et al. Satellite remote sensing for global stocktaking: Methods, progress and perspectives. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2): 243-267. (in Chinese)
- 11 Currie K I, Brailsford G, Nichol S, et al. Tropospheric ¹⁴CO₂ at Wellington, New Zealand: The world's longest record. *Biogeochemistry*, 2011, 104: 5-22.
- 12 Levin I, Schuchard J, Kromer B, et al. The continental European suess effect. *Radiocarbon*, 1989, 31(3): 431-440.
- 13 Levin I, Kromer B, Hammer S. Atmospheric Δ¹⁴CO₂ trend in Western European background air from 2000 to 2012. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, 65(1): 20092.
- 14 Turnbull J, Rayner P, Miller J, et al. On the use of ¹⁴CO₂ as a tracer for fossil fuel CO₂: Quantifying uncertainties using an atmospheric transport model. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D22302.
- 15 Turnbull J C, Keller E D, Norris M W, et al. Independent evaluation of point source fossil fuel CO₂ emissions to better than 10%. *PNAS*, 2016, 113(37): 10287-10291.
- 16 Basu S, Miller J B, Lehman S. Separation of biospheric and fossil fuel fluxes of CO₂ by atmospheric inversion of CO₂ and ¹⁴CO₂ measurements: Observation system simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(9): 5665-5683.
- 17 Basu S, Lehman Scott J, Miller John B, et al. Estimating US fossil fuel CO₂ emissions from measurements of ¹⁴C in atmospheric CO₂. *PNAS*, 2020, 117(24): 13300-13307.
- 18 National Research Council. Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
- 19 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Greenhouse Gas Emissions Information for Decision Making: A Framework Going Forward. Washington, DC: The National Academies Press, 2022.
- 20 WMO. Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. New York: WMO, 2019.
- 21 Zhou L X, Conway T J, White J W C, et al. Long-term record of atmospheric CO₂ and stable isotopic ratios at Waliguan Observatory: Background features and possible drivers, 1991–2002. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(3): GB3021.
- 22 Fang S X, Zhou L X, Tans P P, et al. *In situ* measurement of atmospheric CO₂ at the four WMO/GAW stations in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(5): 2541-2554.
- 23 Li R, Zhang M G, Chen L F, et al. CMAQ simulation of

- atmospheric CO₂ concentration in East Asia: Comparison with GOSAT observations and ground measurements. *Atmospheric Environment*, 2017, 160: 176-185.
- 24 Zhou W J, Wu S G, Huo W W, et al. Tracing fossil fuel CO₂ using $\Delta^{14}\text{C}$ in Xi'an city, China. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 538-545.
- 25 Niu Z C, Zhou W J, Wu S G, et al. Atmospheric fossil fuel CO₂ traced by $\Delta^{14}\text{C}$ in Beijing and Xiamen, China: Temporal variations, inland/coastal differences and influencing factors. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5474–5480.
- 26 Niu Z C, Zhou W J, Cheng P, et al. Observations of atmospheric $\Delta^{14}\text{CO}_2$ at the global and regional background sites in China: Implication for fossil fuel CO₂ inputs. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(22): 12122-12128.
- 27 Niu Z C, Feng X, Zhou W J, et al. Tree-ring $\Delta^{14}\text{C}$ time series from 1948 to 2018 at a regional background site, China: Influences of atmospheric nuclear weapons tests and fossil fuel emissions. *Atmospheric Environment*, 2021, 246: 118156.
- 28 Zhou W J, Niu Z C, Wu S G, et al. Fossil fuel CO₂ traced by radiocarbon in fifteen Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138639.
- 29 Zhou W J, Niu Z C, Wu S G, et al. Recent progress in atmospheric fossil fuel CO₂ trends traced by radiocarbon in China. *Radiocarbon*, 2022, 64(4): 793-803.
- 30 Feng T, Zhou W J, Wu S G, et al. High-resolution simulation of wintertime fossil fuel CO₂ in Beijing, China: Characteristics, sources, and regional transport. *Atmospheric Environment*, 2019, 198: 226-235.
- 31 Wang P, Zhou W J, Xiong X H, et al. Source attribution of atmospheric CO₂ using ^{14}C and ^{13}C as tracers in two Chinese megacities during winter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(12): e2022JD036504.
- 32 Hu C, Xiao W, Griffis T J, et al. Estimation of anthropogenic CH₄ and CO₂ emissions in Taiyuan—Jinzhong region: One of the world's largest emission hotspots. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(8): e2022JD037915.

Atmospheric ¹⁴CO₂ observation: A novel method to evaluate carbon emissions

NIU Zhenchuan WANG Peng WU Shugang ZHOU Weijian*

(1 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;

2 Xi'an Accelerator Mass Spectrometry Center, Xi'an 710061, China)

Abstract As an important carbon emitter, China faces the stress of carbon peaking and carbon neutrality goals and international carbon reduction duty. The accurate data of carbon emissions are important to evaluate the carbon peaking and carbon neutrality goals and fulfill the international duty of carbon reduction. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report recommends the combination of top-down atmospheric CO₂ observation with atmospheric inversion to verify the bottom-up inventory of carbon emissions, and the atmospheric ¹⁴CO₂ observation can make the verification more accurate. Radiocarbon (¹⁴C) is the most precise tracer of fossil fuel CO₂ and is widely recommended by the international community to evaluate the carbon emissions. Based on the international developing trends and the situation in China for atmospheric ¹⁴CO₂ observation, this study suggests to establish the atmospheric ¹⁴CO₂ observation network as soon as possible, with more supporting; to conduct training to unify the standard, and to participate in international exchanges; and to combine the ¹⁴CO₂ observation with atmospheric inversion to obtain the carbon emissions. The purpose of the ¹⁴CO₂ observation is to make the research level of Chinese carbon emissions in line with the international standards, to improve the reliability of carbon emission data in China, and then to serve the carbon peaking and carbon neutrality goals and climate diplomacy negotiations.

Keywords radiocarbon, fossil fuel CO₂, carbon emissions, carbon peaking, carbon neutrality, new method

牛振川 中国科学院地球环境研究所研究员。主要研究领域：¹⁴C 环境示踪与温室气体观测等。E-mail: niuzc@ieecas.cn

NIU Zhenchuan Professor of Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences. His research focuses on radiocarbon environmental tracing and greenhouse gas observation, etc. E-mail: niuzc@ieecas.cn

周卫健 中国科学院院士, 中国科学院地球环境研究所研究员。主要研究领域: 宇宙成因核素环境示踪与年代学研究等。E-mail: weijian@loess.llqg.ac.cn

ZHOU Weijian Academician of Chinese Academy of Sciences, Professor of Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences. Her research focuses on environmental tracing and chronology of cosmogenic nuclides, etc. E-mail: weijian@loess.llqg.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author