• 侯学煜评述 •

碳中和的生态学透视

方精云^{1,2*}

¹北京大学城市与环境学院, 生态研究中心, 北京 100871; ²云南大学, 昆明呈贡 650500

摘要 在简述碳中和概念的基础上, 重点对碳中和的实现途径及生态系统碳汇的重要性进行了评述, 认为碳减排和碳增汇是实现“碳中和”的两个决定因素; 碳减排的核心是节能、调结构、增效和发展清洁能源, 碳增汇的核心是生态保护、建设和管理。由于植被自然生长和生态建设等因素, 中国陆地生态系统发挥了, 并将在未来继续发挥着重要的碳汇作用。为增强生态系统的固碳能力, 作者提出“三优”生态建设和管理原则, 即“最优的生态系统布局、最优的物种配置、最优的生态系统管理”。此外, 文章还对“后碳中和”时代可能出现的问题和挑战进行了展望, 认为碳中和后, 由于气候变化, 特别是大气CO₂浓度增速减缓甚至下降等因素, 可能导致全球性的植被生产力下降, 对此可能带来的新的环境问题需要提前谋划和应对。

关键词 碳中和; 碳排放; 碳汇; “三优”增汇原则; “后碳中和”时代

方精云 (2021). 碳中和的生态学透视. 植物生态学报, 45, 1173-1176. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0394

Ecological perspectives of carbon neutrality

FANG Jing-Yun^{1,2*}

¹Institute of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; and ²Yunnan University, Chenggong, Kunming 650500, China

Abstract

In this article, I first briefly introduce the concept of “Carbon Neutrality”, and then discuss the vital role of ecosystem carbon sinks in achieving the carbon neutrality target. It is assertive that any efforts to achieve the carbon neutrality target depend unavoidably on both reducing carbon emissions and enhancing carbon sequestrations. There are four key factors in reducing carbon emissions, including lowering energy consumption in human activities, restructuring fossil energy consumptions especially decreasing coal consumption, promoting energy use efficiency, and developing clean and low-carbon energy. Enhancing carbon sequestration relies inclusively on restoration, construction, and better management of the ecosystems. Benefited from enhanced vegetation growth and ecological engineering practice, Chinese terrestrial ecosystem has acted and will continue to act the significant role in the carbon sequestration. To improve the ecosystem carbon sequestration, I propose the “three-optimization principles”, i.e., optimal ecosystem arrangement, optimal species setting, and optimal ecosystem management. In addition, I also state some viewpoints on potential problems and challenges in the “post-carbon neutrality” era. It may be crucial to proactively and rationally think about the possibilities of declining global vegetation productivity and relevant new environmental issues caused by a decrease in the CO₂ concentration rising in the era.

Key words carbon neutrality; carbon emission; carbon sequestration; “three-optimization principles” of enhancing carbon sinks; “post-carbon neutrality” era

方精云, 北京大学教授、云南大学校长、中国科学院院士。主要从事全球变化生态学、植被生态与生物多样性、生态遥感、生态草牧业等方面的研究。发表论文400余篇, 被引用4.5万余次。曾获国家自然科学基金二等奖、长江学者成就奖、教育部及北京市自然科学一等奖以及惠泰克杰出生态学家奖等奖项。

收稿日期Received: 2021-11-02 接受日期Accepted: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金委员会基础科学中心项目(31988102)。Supported by the National Natural Science Foundation of China for Basic Science Center Project (31988102).

* E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

Fang JY (2021). Ecological perspectives of carbon neutrality. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 1173-1176. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0394

1 “碳中和”概念与产生背景

按照联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新的评估,从19世纪后半叶(1850–1900年)到21世纪10年代(2011–2020年)的140余年间,大气CO₂浓度由285 ppmv增加至2020年的414 ppmv,全球平均温度增加了1.09 °C (IPCC, 2021)。温度上升被认为是主要由化石燃料使用和热带毁林等人为活动引起的,以CO₂为主的温室气体浓度急剧升高所致(IPCC, 2021)。为了减缓由温室气体浓度增加导致的全球温暖化,过去30年间国际社会做出了巨大努力,先后制定了《联合国气候变化框架公约》(1992)、《京都议定书》(1997)、《哥本哈根协定》(2009)、《巴黎协定》(2015),以及最近刚刚在英国格拉斯哥举行的第26届联合国气候变化大会(COP26)上通过的《格拉斯哥气候协议》(2021)等或多或少具有法律约束效力的国际公约。特别是近年来,作为碳减排的全球性重大行动,世界主要经济体先后公布了“双碳”(碳达峰、碳中和)自主减排目标。

“碳达峰”是指化石燃料使用导致的CO₂排放量达到峰值。欧美国家于多年前已经实现了“碳达峰”,比如欧盟在1980年前后达到峰值,美国在2005年前后达到峰值(Friedlingstein *et al.*, 2020)。我国政府于2015年向世界承诺,于2030年或这之前达到峰值(中国国家发展和改革委员会应对气候变化司, 2015)。我们前期的一项研究也表明,按照6种情景预测,中国“碳达峰”的年份在2023–2030年之间(Zheng *et al.*, 2016)。而从现实情况来看,近几年我国的人为碳排放已基本处于平稳阶段(约27亿t C·a⁻¹);因为新冠肺炎的原因,2020年我国化石燃料的CO₂排放量还比2019年减少了约0.9% (GCP, 2020)。

“碳中和”是指化石燃料使用及土地利用变化导致的碳排放量,与陆海生态系统吸收及其他技术方式固存的碳量之间达到平衡,即CO₂净排放为0 (公式(1))。一些机构和专家把“碳中和”概念延用到其他的主要温室气体(例如甲烷、氧化亚氮等),并进而提出“温室气体净零排放”(net zero GHGs emission)或“气候中和”(climate neutrality)等概念(IPCC, 2018)。这些概念与“碳中和”虽然在内涵上有所不同,但彼此关联,在公众认知中往往有所混杂。考虑到这些

温室气体排放涉及更复杂的问题,包括排放源与排放机制、检测手段、温室气体效应等,具有很大的不确定性,因此,笔者认为将“碳中和”仅限于CO₂为宜。

“碳中和”方程式如下:

$$\text{碳中和} = \text{人为碳排放} - (\text{海陆碳汇} + \text{CCUS}) = 0 \quad (1)$$

式中,人为碳排放=化石燃料使用排放+土地利用排放;CCUS (carbon capture, utility, and storage)是指通过物理、化学和生物学的方法进行CO₂捕集、封存与利用。目前看来,其实现大规模的实际应用存在很大困难,短期内不会成为碳固存的主要方式。

中国是“碳中和”行动的积极推进者。2020年9月中国政府宣布,中国将争取在2060年前实现“碳中和”(习近平, 2020)。至目前为止,世界上已有多个国家公布了实现“碳中和”目标的年份(Darby & Gerretsen, 2019),如欧盟及美、日等国家宣布2050年前实现“碳中和”,而有些发展中国家,如不丹等由于现代化程度低、使用的化石能源少,已经处于“碳中和”状态。但对一些国家,特别是像我国这样一个正处在实现工业化和现代化进程中,且“碳达峰”(2030年)与“碳中和”(2060年)之间仅有30年间隔的国家,必然面临着技术升级和产业转型的巨大挑战。

2 “碳中和”的实现途径及生态系统碳汇的决定作用

实现“碳中和”的路径如何?笔者做简要分析。从“碳中和”的定义可以看出,实现“碳中和”的两个决定因素是碳减排和碳增汇。虽然CCUS也会有所贡献,但考虑到其在较长一段时间内作用有限,因此实现“碳中和”的一切努力都依赖于碳减排和碳增汇这两个因素。

碳减排的核心是节能、调结构、增效和发展清洁能源,具体简述如下:

(1)节能。碳排放主要来自能源的使用,因此减少人类生产、生活过程中所消耗的能源显然将减少碳排放。

(2)调整能源结构。煤炭、石油、天然气和水泥生产是碳排放的重要来源,其中煤炭尤其是排放大户,因此,能源结构与碳排放有着直接关系。近年来,

我国能源结构进行了有效调整。初步核算, 2019年我国煤炭消费量占能源消费总量的比重为57.7%, 天然气、水电、核电、风电等清洁能源消费量占能源消费总量的比重为23.4%, 非化石能源消费量占能源消费总量的比重为15.3% (中华人民共和国国务院办公厅新闻办公室, 2020)。

(3)提高能源利用效率。能源利用效率反映一个国家技术水平和低碳能源占比的程度。截至2019年底, 我国单位GDP的碳排放较2005年降低约48.1%, 能效得到显著提升(中华人民共和国国务院办公厅新闻办公室, 2020)。

(4)发展低碳和清洁能源。水能、风能、太阳能、核能等清洁能源是实现碳中和的关键因素。如上所述, 过去10多年, 我国清洁能源的比重显著提升。另外, 有人认为生物质能源在我国能源结构中可以占据重要位置。但生物质能源的生产需要消耗大量的水土资源, 还会与粮食生产发生冲突, 况且我国土地资源匮乏、生态脆弱, 又是人口大国, 因此笔者认为生物质能源在我国能源结构中的作用十分有限。

碳增汇的核心是生态保护、建设和管理。陆地和海洋生态系统通过光合作用和碳循环过程, 将大气中的CO₂固定下来, 成为大气CO₂的重要之汇(称“生态系统碳汇”)。一般来说, 化石燃料和土地利用排放的CO₂有3个主要去向(储存库或汇)(图1)。从全

球尺度看, 在过去的10年间(2010–2019年), 这些人为排放的CO₂ (总量约为110亿t C·a⁻¹), 约46% (51亿t C·a⁻¹)留存在大气中(即大气CO₂浓度增加的部分), 31% (约34亿t C·a⁻¹)被陆地生态系统吸收固定(称为陆地生态系统碳汇, 或简称“陆地碳汇”), 23% (约25亿t C·a⁻¹)被海洋生态系统吸收固定(称为海洋生态系统碳汇, 或简称“海洋碳汇”)(Friedlingstein *et al.*, 2020)。需要说明的是, 在图1中, 以热带毁林为代表的土地利用变化导致了每年约16亿t的碳释放, 因此全球陆地生态系统的净碳汇实际上只有约18亿t·a⁻¹。不过, 对于我国而言, 热带毁林等导致的碳排放可忽略不计。另外, 考虑到海洋绝大部分是全球公共资源, 世界各国应该平等地获取这部分碳汇资源(方精云等, 2018)。假定全球海洋碳汇按各国人口占世界总人口的比例进行均等的分配, 那么, 我国碳中和平衡式可以近似地用公式(2)表示。

碳中和 = 化石燃料排放 – (陆地碳汇 +

$$\text{全球海洋碳汇} \times \frac{14}{75} + \text{CCUS}) = 0 \quad (2)$$

式中, 14和75分别为中国和全球的总人口(亿)。

按照最近的预测, 未来40年(2021–2060年), 我国陆地生态系统的碳汇潜力为2.97–3.60亿t C·a⁻¹, 其中生态建设增汇0.54–0.68亿t C·a⁻¹。在实现“碳中和”目标的2060年, 我国陆地碳汇潜力为3.6亿t C·a⁻¹ (其中生态建设增汇0.68亿t C·a⁻¹); 如果考虑海洋碳汇, 按照公式(2), 我国可获得4.67亿t C·a⁻¹的海洋碳汇配额。那么, “碳中和”目标实现后, 我国化石燃料排放的CO₂量应为8.27亿t C·a⁻¹, 相当于我国目前化石燃料总排放(27亿t C·a⁻¹)的30%左右。可见, 保护生态系统, 实施生态建设和管理对于“碳中和”至关重要。

为了有效地增强生态系统的固碳能力, 笔者提出“三优”生态建设和管理原则(增汇原则), 即“最优的生态系统布局、最优的物种配置、最优的生态系统管理”, 以实现“宜林(草)则林(草)、适地适树(草)、最优管理”的碳汇最大化目的。也就是说, 为实现碳汇最大化, 我们可系统性地开展3个层面的工作: 首先对全国生态系统进行生态地理区划, 确定各个区域适宜于建设的潜在生态系统类型(森林、灌丛或草地等); 在此基础上, 确定各地适宜种植的植物种类(适地适种), 建设最适宜的植被类型; 然后对这些植被类型进行科学合理的管理。

图1 2010–2019年间, 全球人类活动导致的碳排放及其去向(数据来自Friedlingstein *et al.*, 2020). 1 Pg = 10¹⁵ g = 10亿t。
Fig. 1 Global anthropogenic CO₂ emissions and their fates annually between 2010 and 2019 (Data from Friedlingstein *et al.* (2020)).

3 “后碳中和”时代的可能挑战

在推进“碳中和”目标实现的同时,我们必须考虑“后碳中和”时代人类可能面临的新的问题和挑战:如果没有CO₂排放或者随着大气CO₂浓度的减少,自然和社会系统将发生什么样的变化?一个可能的情景是:大气CO₂浓度将有所降低,随之带来地球降温、变旱、土地生产力下降、粮食减产等问题。从这个意义上讲,上文提到的陆地和海洋碳汇潜力的预测值应该偏大。对这些“后碳中和”时代的问题,我们从现在起就需要有前瞻性的考量。

另外,一个必须注意的问题是,“碳中和”涉及方方面面、各行各业,错综复杂,影响久远。因此,推进“碳中和”,必须在国家的统一规划和指导下,进行统筹规划和布局。“碳中和”除了减排问题,还有增汇问题,而这一问题更为复杂。我们决不可以有“人有多大胆,地有多高产”的冒进思想和不科学行为,杜绝不科学的人工增汇计划,如在不适合种树的旱区进行造林等违背科学规律的做法,因为不科学的造林绿化和生产活动会导致生态系统的破坏甚至崩溃。

“碳中和”的核心目标是试图解决地球变暖问题。英国科学家在21世纪初就提出了地球工程(Geoengineering)设想,试图通过人为措施,向大气层释放致冷颗粒,使地球快速降温(Keith, 2000; Crutzen, 2006)。虽然这个设想具有很大的生态风险,但却向人们传递出一个重要信号:人类有智慧解决因自己的原因导致的地球环境问题,地球不会因人类自己的生产生活活动而毁灭。这是我们人类应该有的自信、能力和底气。

致谢 中国科学院植物研究所石岳博士帮助制图。

参考文献

- Crutzen PJ (2006). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77, 211-219.
- Darby M, Gerretsen I (2019). Which countries have a net zero carbon goal? Climate Home News. [2019-06-16]. <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal/>.
- Department of Climate Change, National Development & Reform Commission of China (2015). Enhanced Actions on Climate Change: China's Intended Nationally Determined Contributions. [2015-06-30]. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/China%20First/China%20First%20NDC%20Submission.pdf>.

- Fang JY, Zhu JL, Yue C, Wang SP, Zheng TL (2018). *Carbon Emissions from China and the World*. Science Press, Beijing. 240. [方精云, 朱江玲, 岳超, 王少鹏, 郑天立 (2018). 全球及中国碳排放. 科学出版社, 北京. 240.]
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Hauck J, Olsen A, Peters GP, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quere C, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Alin S, et al. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12, 3269-3340.
- GCP (Global Carbon Project) (2020). Global carbon budget 2020. [2020-12-12]. <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive.htm#CB2020>.
- IPCC (2018). Annex I: Glossary (Matthews JBR ed.)/Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, et al. *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. World Meteorological Organization, Geneva. 541-562.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Press, Cambridge, UK.
- Keith DW (2000). Geoengineering the climate: history and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 245-284.
- The State Council Information Office of the People's Republic of China (2020). *Energy in China's New Era*. People's Publishing House, Beijing. [中华人民共和国国务院新闻办公室 (2020). 新时代的中国能源发展. 人民出版社, 北京.]
- Zheng TL, Zhu JL, Wang SP, Fang JY (2016). When will China achieve its carbon emission peak? *National Science Review*, 3, 8-12.
- Xi JP (2020). Statement at the general debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly. *The Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, (28), 5-7. [习近平 (2020). 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话. 中华人民共和国国务院公报, (28), 5-7.]

责任编辑: 刘玲莉 责任编辑: 谢 巍