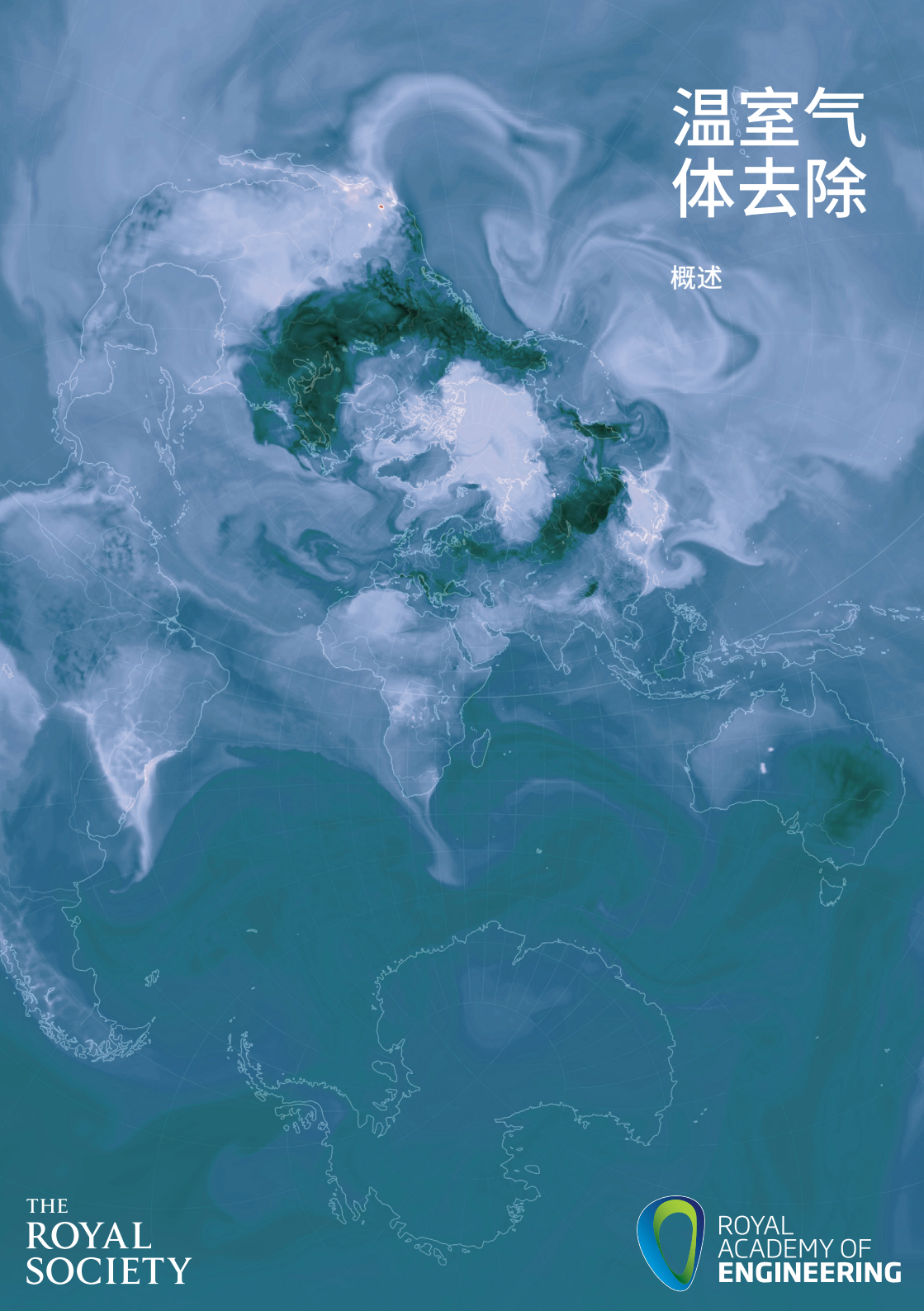
# 温室气体去除

## 概述



THE ROYAL SOCIETY

ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING

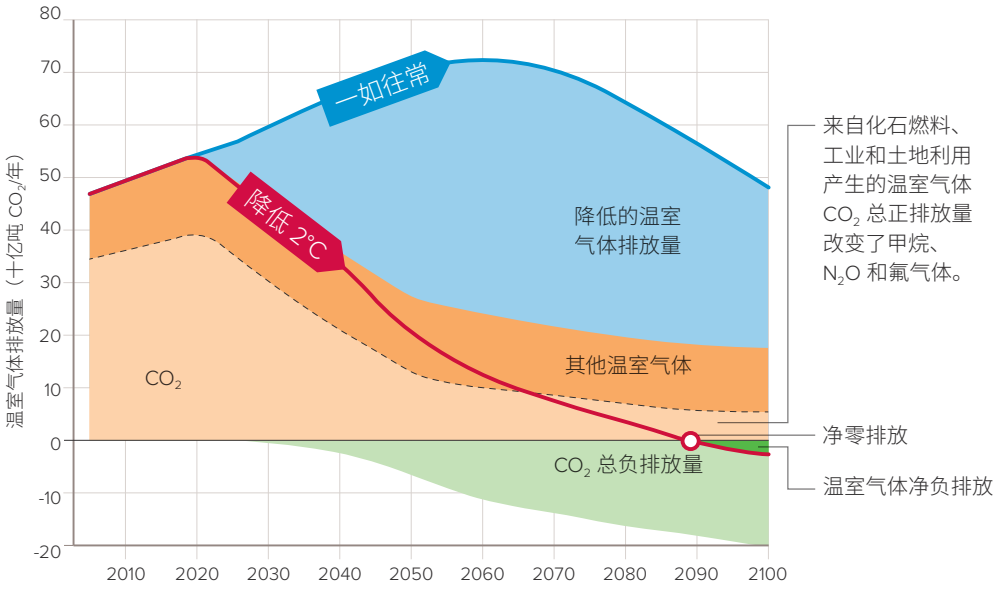
# 概述

商业、能源和产业战略部 (Department for Business, Energy and Industrial Strategy) 邀请英国皇家学会和英国皇家工程院 (Royal Academy of Engineering) 考量有关温室气体去除 (GGR) 的科学观点。本总结性报告是对英国和全球背景下 GGR 方法的机遇与障碍进行探索的主要发现的总结。

2015 年，全球政府齐聚一堂，商定可最大程度地减少气候变化所带来的负面影响的框架。《巴黎协定》设定了目标，旨在将全球平均温度上升限制在“不超过工业化前水平 2°C”，并“努力”将其限制在 1.5°C 以内。

**图 1**

未来 $CO_2$ 的排放和去除。为了实现《巴黎协定》中设定的 2°C 目标，需要迅速且显著地减少排放量（蓝色），而且要从下一个十年开始，有效地从大气（绿色）中去除温室气体。




来源：联合国环境规划署《2018 年排放差距报告》

这一雄心壮志需要迅速减少排放，而且到本世纪下半叶实现“净零排放”。在某些行业，尤其是农业和航空业，很难完全消除温室气体的排放，因此我们将需要用技术从大气中去除温室气体。对未来能源系统的建模表明，这种去除需要大规模进行，即每年去除约当前每年排放量的四分之一。

## 温室气体去除

GGR 方法涉及两个主要步骤：从大气中去除温室气体以及长时间存储。该过程最适用于二氧化碳 ($CO_2$) 的去除。去除可通过多种方法实现，包括加速与岩石的天然无机反应的生物学或工程化学过程。之后，将碳存储在陆基生物质、地下地质构造、海洋或建筑环境中。GGR 方法需要如土地、能源或水等资源，这限制了 GGR 方法的应用规模和地点，并导致 GGR 方法之间以及 GGR 方法与其他人类活动（例如粮食生产）之间的资源竞争。但一些 GGR 方法还可提供协同效益，这可以帮助甚至成为 GGR 方法部署的主要原因；这些协同效益中可能包括作物生产力和生物多样性的提高。

## 方法组合

通过使用方法组合，可最好地实现期望达到的 GGR 水平。增加植树造林和生物能源碳捕获和储存 (BECCS) 通常被认为是部署 GGR 的主要途径，但它们会受到可用土地面积、资源需求以及对生物多样性和社会公平的潜在影响的限制。将这些方法作为方法组合的一部分进行部署，将在很大程度上降低未来可能的环境和社会影响。

## 仍需进一步研究的方法

如今，已使用了某些 GGR 方法，而其他方法则需要大量改进和论证，然后才能用于大规模去除碳排放。当考量所需规模时，未对任何一种方法在其整个生命周期内进行充分评估。

GGR 方法会以不同方式给环境带来影响。因此，在示范性试点研究、扩量和全面部署期间，将需要仔细评估 GGR 方法的改进对环境的影响。这些可持续性问题将影响公众对 GGR 的认识，这些问题范围广泛，取决于方法和地点，并可能对其适用性构成限制。

## 部署

尽早部署 GGR 方法及其快速扩量将使实现气候目标变得更加容易，并有助于避免破坏性的气候“超载”。陆地碳存储的生物方法可以被快速应用，但是几十年后这将形成饱和状态，因此其他 GGR 方法预期在本世纪末期变得至关重要。

为具有经济性并追求大规模去除，大多数 GGR 方法都需要为碳定价或其他奖励制度。如果实现了对每吨 $CO_2$ 100 美元的碳价格的未来预测，那么将使许多 GGR 方法在经济上可行。

本手册随附的报告分为三个部分，概述如下：

**GGR 方法：**在包括可扩展性、成本和环境风险等关键问题的子标题下对每种方法的描述。

**跨领域问题：**建立适当的 GGR 方法组合所涉及的问题（资源、经济、社会和其他问题）的概述。

**方案：**开发两个 GGR 示例方案；英国，在 2050 年前实现净零排放，以及全球在 2100 年前实现温度降低 1.5°C.

# GGR 方法

**植树造林**——种植新树木并改善现有森林的管理。随着森林树木的生长，它们可吸收大气中的 $CO_2$ 并将其存储在活的生物质、死亡的有机物质和土壤中。

**生境恢复**——恢复泥炭地和海岸湿地，以提升其碳储存能力。这也可防止碳通过进一步降解进行释放，这种方法经常会带来许多其他协同效益。

**土壤固碳**——改变如耕作或轮作等农业方式以增加土壤碳含量。

**生物炭**——将部分燃烧的生物质掺入土壤中。生物质在没有氧气的情况下生长和燃烧（热解）以产生木炭状产物，当添加到土壤中时可以稳定有机物。

**生物能源碳捕获和储存 (BECCS)** ——利用生物质能源捕捉 $CO_2$ 排放并将其存储起来，以提供生命周期的 GGR。

**海洋肥化**——向海洋施加营养成分以增强光合作用并去除大气中的 $CO_2$。

**生物质建筑材料**——在建筑中使用林业材料可以延长天然生物质的碳储存时间，并可以促进林业的进一步发展。

**增强陆地风化**——散布在农业用地上的地面硅酸盐岩石会与 $CO_2$ 发生反应，将其从大气中去除。

**矿物碳酸化**——加速硅酸盐岩石在地表上方或下方转化为碳酸盐，从而永久储存 $CO_2$。

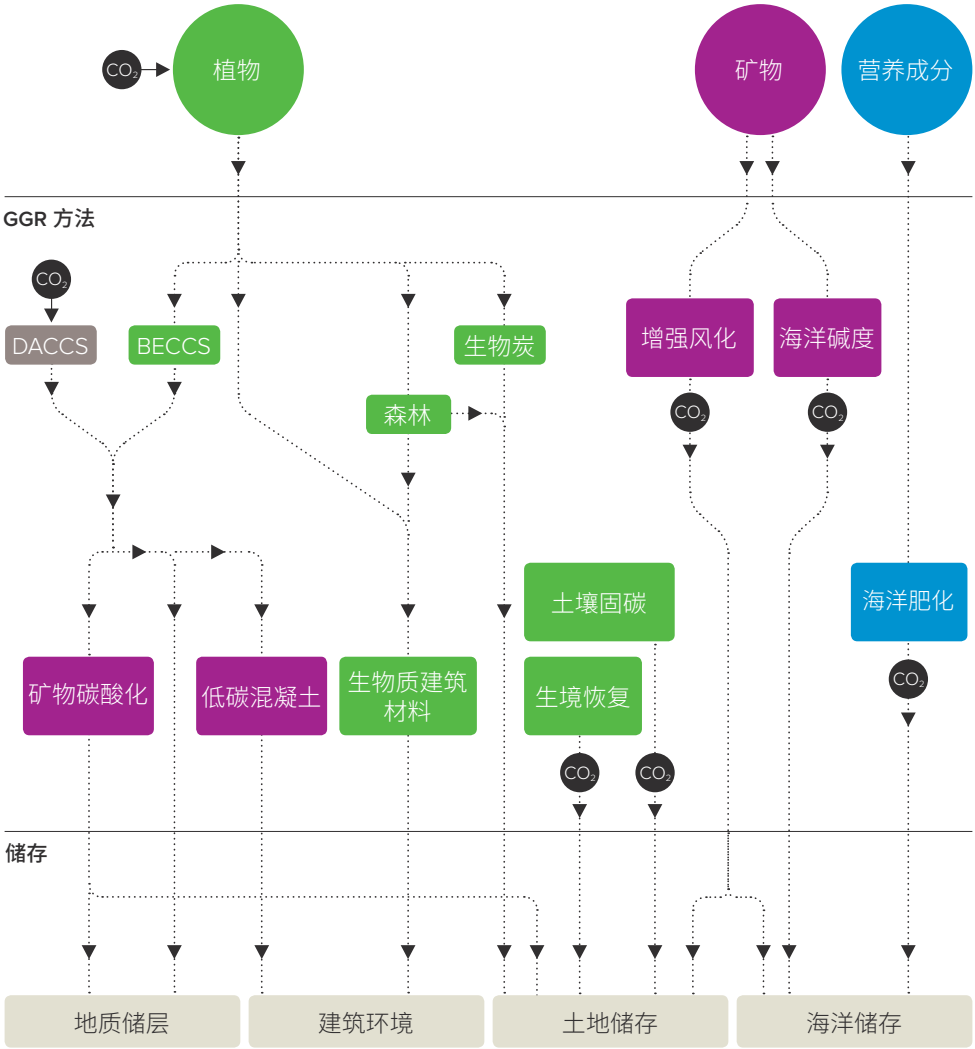
**海洋碱度**——增加海洋中如钙之类的离子浓度，以增加海洋对 $CO_2$ 的吸收，并将其逆转为酸性。

**直接空气碳捕获和储存 (DACCS)** ——使用工程流程来捕获大气中的 $CO_2$，以用于后续的地质封存。

**低碳混凝土**——改变混凝土的成分、制造或回收方法，以增加其 $CO_2$ 的存储量。

## 图 2

各种 GGR 方法的 $CO_2$ 捕获和储存图。



# 跨领域问题

**资源**
每种 GGR 方法都需要土地、能源、矿物或水等资源，这限制了 GGR 方法的应用规模和地点，并导致 GGR 方法之间以及 GGR 方法与其他人类活动之间的资源竞争。

**储存**
GGR 方法既包括天然储存（森林、土壤固碳）方法，也需要专门的行动来储存 $CO_2$（BECCS、DACCS）。

**环境**
一些 GGR 方法可为环境提供协同效益，这可以帮助甚至成为方法部署的主要原因；而其他方法则可能直接或在整个生命周期中造成不利影响。

**科学与技术**
对 GGR 方法的成本、可扩展性、安全性和环境影响知之甚少，这限制了 GGR 方法的应用，也使得研究和改进 GGR 方法成为必要。

**经济**
许多 GGR 方法的部署十分昂贵。经济机制可以建立市场并协助资源有效分配。

**法律**
排放和去除（及其报告）受国家和国际法律管辖。

**社会层面**
社会将与这些方法以多种方式进行互动。反对或支持不足会成为方法部署的限制。

每种因素都会影响所部署的 GGR 方法及其应用地点。部署 GGR 方法组合可分散这些问题的影响。

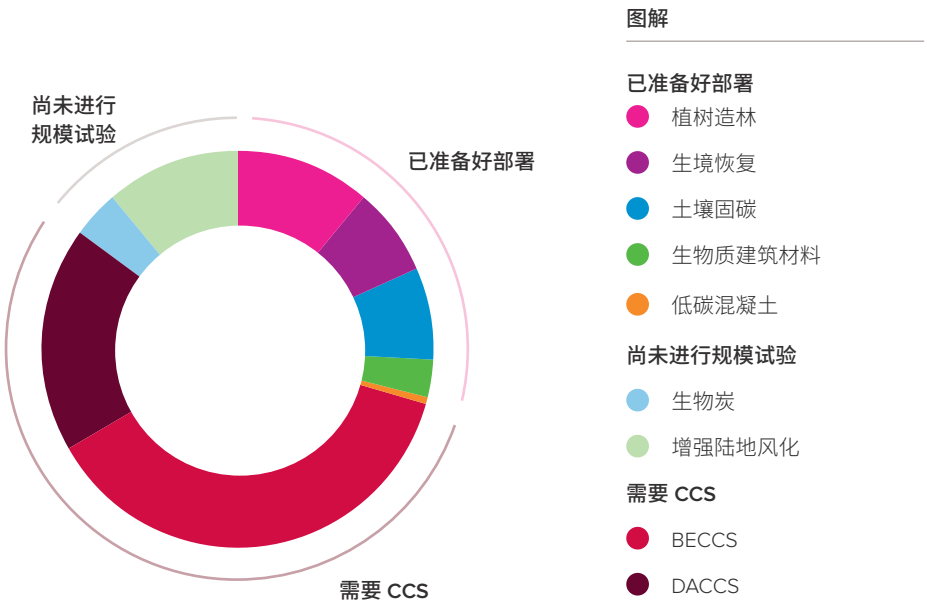
# 方案

多个领域的专家组考虑了英国和全球性应用 GGR 方法组合的方案。

**英国方案：2050 年前实现净零排放**

在英国，截至 2050 年，预计可最大程度减少温室气体排放约 130 $MtCO_2$ pa。在英国，用 GGR 抵消这些排放量以达到“净零排放”是可行的，但却非常具有挑战性。这涉及许多不同的 GGR 方法部署以及生物质的引入。为了达到这样的 GGR 水平，现在需要加大造林、生境恢复和土壤固碳的能力，研发目前尚未得到验证但很有前景的 GGR 方法，以及建立大量的基础设施和碳捕获与封存 (CCS) 能力。

图 3



# 英国净零排放的关键行动

- 在英国的大片土地上，进行植树造林、生境恢复和土壤固碳的快速扩量。
- 建立奖励或补贴制度，以鼓励改变土地实践，尤其是土壤固碳。这可能构成取代欧盟共同农业政策的框架的一部分。
- 鼓励改变建筑实践，使用木材和用碳酸化废料制造的混凝土（同时认识到这些方法在 GGR 方面的总体潜力有限）。
- 制定监控和验证程序及计划，以跟踪每种方法提供的 GGR 的有效性。
- 大规模种植和进口可持续生物质，以满足对能源和 GGR 的需求。
- 对英国农业土壤中增强的风化和生物炭的 GGR 潜力进行研究，并对 BECCS 和 DACCS 进行长期部署研究。这应包括评估协同效益、社会与环境风险、监控与评价，并包括实地试点示范。
- 利用英国对 CCS 适当储层以及相关工程和行业专业知识的使用，为运输和存储 $CO_2$ 建立坚实的基础设施。

**版权所有：**
© Empato。

# 到 2100 年全球累积 GGR 达 1.5°C

综合评估模型提供的证据表明，截至 2100 年，需预期积累 GGR 约 8100 亿吨 $CO_2$，以将温度升高限制在不超过工业化前水平 1.5°C。这相当于 2017 年后约 15 年的温室气体排放量。全球范围内可用于潜在 GGR 部署的大面积土地，可以实现这一全球目标，但仍然极具挑战性。在这一时间范围内，许多自然沉降将变得饱和，需要多种 GGR 方法。需要进行监控和维护，以防止碳从存储中释放出来。贸易方案可帮助在最有效和最经济的地区采取行动。

考虑采取全球对策可以为 GGR 带来巨大潜力，但是跨国界采取行动可能需要采取政治解决方案。

**下图:**
Carbon Engineering 的空气接触器设计渲染。该装置将是捕获 1 $MtCO_2$ pa 的数个装置之一。Carbon Engineering Ltd. 版权所有。

# 建议

为了实现《巴黎协定》关于气候变化的目标，需要从大气中去除温室气体。本报告建议采取以下国际行动来实现这一 GGR：

**建议 1**
继续并加大全球努力以减少温室气体排放。大规模的 GGR 具有挑战性且昂贵，并不能取代降低排放量的方法。

**建议 2**
现在实施全球 GGR 方法组合，以实现《巴黎协定》的目标。该组合应包括现有的陆基方法，但是这些方法不可能提供足够的 GGR 能力，因此必须积极探索其他技术。

**建议 3**
构建 CCS 基础设施。方案构建过程表明，目前仅在地质储层中显示的大量永久性存储对于满足气候目标所需的规模至关重要。

**建议 4**
激励试验人员和早期部署以开发 GGR 方法。这可以评估实际的 GGR 潜力以及每种方法的更广泛社会和环境影响。它还将使发现和降低成本成为可能。

**建议 5**
通过碳定价或其他机制激励去除大气中的温室气体。GGR 具有大规模的经济成本，因此将需要奖励措施来推动技术发展和方法组合的部署。

**建议 6**
建立框架来管理 GGR 部署的可持续性。对各个方法及共同使用进行严格的生命周期评估和环境监控。

**建议 7**
将 GGR 纳入监管框架和碳交易系统。例如，在英国，应将对 GGR 实施的积极支持（土壤固碳、植树造林、生境恢复）纳入新的英国农业或土地管理补贴中。

**建议 8**
建立基于国际科学的标准，以监控、报告和验证 GGR 方法，包括碳固定和环境影响。当前存在生物质和 CCS 的标准，但不适用于普遍的 GGR 方法。

**英国皇家学会**

英国皇家学会是由来自科学、工程和医学各个领域的许多世界上最杰出的科学家组成的自治团体。自 1660 年成立以来，该学会的基本宗旨是认可、促进和支持科学卓越性，并鼓励科学的发展和利用以造福人类。

**学会的战略重点是：**

- 促进科学卓越性
- 支持国际协作
- 向所有人展示科学的重要性

**更多信息**

英国皇家学会
6 – 9 Carlton House Terrace
London SW1Y 5AG

**电话** +44 20 7451 2500
**网址** royalsociety.org

注册慈善机构编号 207043

**英国皇家工程院**

我们的研究员汇集业内最成功、最具才华的工程师，旨在推动和促进卓越的工程技术以造福社会。

我们拥有三个战略重点：使英国成为工程创新和商业领域内的领先国家，应对工程技能危机，以及将工程置于社会核心地位。

我们是展望全球的国家研究院。

**更多信息**

英国皇家工程院
3 Carlton House Terrace
London SW1Y 5DG

**电话** +44 20 7766 0600
**网址** raeng.org.uk

注册慈善机构编号 293074

本文件由 Language Buró
www.languageburo.com
从英语翻译而来

发行日期：2018 年 9 月 DES5563_2

**封面图片**:
全球二氧化碳表面浓度可视化由 Cameron Beccario (earth.nullschool.net) 使用 NASA 戈达德宇宙飞行中心全球建模与同化办公室 (GMAO) 提供的 GEOS-5 数据提供。