

模拟中国农业、林业和其他 土地利用部门(AFOLU)的 温室气体通量：

差距与建议

2023年5月



The
Food and Land Use
Coalition

目录

致谢	1
执行摘要	2
1. 引言	4
2. 中国农业发展和温室气体排放	6
3. 方法和数据	10
4. 模型的覆盖范围方面有何不同?	12
4.1. 土地利用类别的系统边界和覆盖范围	13
4.2. LULUCF碳库的覆盖范围	16
4.3. 模型中LULUCF的覆盖范围 vs. 国家 温室气体排放清单	18
4.4. 农业非二氧化碳温室气体排放与国家 温室气体排放清单的对比	19
5. 不同模型的预测差异如何?	20
5.1. LULUCF部门的预测	21
5.2. 农业部门预测	24
6. 知识差距和改进模型的建议	26
附件一: 模型描述	28
附件二: 图4的数据和情景解释	31
参考文献	32

作者

陈敏鹏

中国人民大学农业与农村发展学院，
中国北京100872；
电子邮件: minpeng.chen@ruc.edu.cn

Nicklas Forsell

奥地利国际应用系统分析研究所
(IIASA)，奥地利拉克森堡A-2361；
电子邮件: forsell@iiasa.ac.at

余莎

美国马里兰大学全球可持续发展中
心，美国马里兰 20742；
电子邮件: sha@umd.edu

常锦峰

浙江大学环境与资源学院，
中国杭州 310058；
电子邮件: changjif@zju.edu.cn

汪笑溪

浙江大学农业经济与管理系中国农
村发展研究院，中国杭州 310058；
电子邮件: xiaoxi_wang@zju.edu.cn

Aline Mosnier

可持续发展方案联盟(SDSN)，
法国巴黎 75009；
电子邮件: aline.mosnier@unsdsn.org

崔焱绒

中国人民大学农业与农村发展学院，
中国北京 100872；
电子邮件: cuiyr_sonia@foxmail.com

致谢

本文作者感谢柏兆海、李伟、刘俊玲、刘竹和周丰的支持。本文仅代表作者个人观点，并不代表相关和/或支持机构的观点。作者感谢所有审稿人，尤其是滕飞和Martjan Schelhaas以及其他同事的建议，他们对最终版本大有贡献。

建议引用方式：Minpeng Chen, Nicklas Forsell, Sha Yu, Jinfeng Chang, Xiaoxi Wang, Aline Mosnier, Yanrong Cui, 2023. Modelling greenhouse gas fluxes from China's agriculture, forestry and land use sector: Gaps and recommendations. The Food and Land Use Coalition, London.

执行摘要



本报告评估了模拟和预测中国农业、林业和其他土地利用（AFOLU）部门温室气体（GHG）排放和碳汇的模型及其情景。通过比较八个模型（GLOBIOM-中国、MAgPIE-中国、GCAM5.3、FABLE Calculator-中国、ORCHIDEE、PECE-LIU、AGHG-INV和SRNM），分析不同模型覆盖的部门、碳库、土地利用类别，并比较不同模型情景预测的差异。

就土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF）部门而言，这些模型不同程度地涵盖了最直接相关的土地利用类别，如林地、草地和农田等。但是不同模型采用的IPCC层级方法和对于特定碳库的覆盖范围存在巨大差异。就农业部门而言，八个模型在覆盖范围和估算方法上具有更大的相似性，主要采用IPCC层级2的方法计算温室气体通量。

现有模型对中国历史和未来的土地利用、土地利用变化，以及林业排放量和清除量的评估和情景预测之间具有显著的不确定性。模型之间的历史净排放量估计值的差异最大能够达到11.19亿吨CO₂e，与2014年中国国家温室气体清单中评估的碳汇量（11.50亿吨CO₂e）相当。不同模型对中国LULUCF部门未来的变化趋势预测并不一致，无法说明未来中国LULUCF的碳汇将增加还是将减少。

多数模型预计，中国的农业部门在基准（BAU）情景下非CO₂温室气体的排放量（主要是CH₄和N₂O）仍将2030年后缓慢增加，并在2045年至2060年达到峰值。中国农业非CO₂温室气体排放峰值的预测范围为8.0至14.0亿吨CO₂e，未来的减缓潜力范围为2.0至8.0亿吨CO₂e。上述数值的差异主要来源于不同模型基准年、模型结构、情景假设和参数选择上的差异。

总体而言，不同模型对中国AFOLU部门的设计存在差异，因此，在比较和使用不同模型的预测和制定政策目标时要非常谨慎。本报告强调了进一步增强中国AFOLU部门模型的必要性，提出了优先行动领域，模型的发展能够为提出符合《巴黎协定》提出的2°C/1.5°C温度目标要求的中国AFOLU部门减缓目标和路径相关的政策决策提供支持。优先行动领域包括增强模型开发的国际合作，加强模型之间的数据共享，和加强AFOLU部门减排的多模型比较。

1.引言



《巴黎协定》设定了到本世纪末将全球平均温度的升幅控制在工业化前水平2°C以内，并努力限制在1.5°C的长期目标。为了实现这一目标，世界各国需要制定相应的战略和计划促进所有部门实现快速和深度脱碳转型。林业和农业活动是增加碳汇、减缓温室气体排放战略的重要组成部分。这个部门的土地管理和土地利用变化可能是温室气体的排放源，包括二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）和氧化亚氮（N₂O），也可能是温室气体的碳汇。碳汇是指能够除了大气外、能够从大气中去除二氧化碳的碳库。

全球农业、林业和其他土地利用（AFOLU）ⁱ 部门每年的排放约112亿吨CO₂e^{1,2,3} 约占所有人为温室气体净排放量的25%，其中近一半来自农业，另一半来自土地利用变化^{4,5,6}。同时，土地利用部门具有巨大的经济减缓潜力：若碳价为20美元/吨CO₂e和100美元/吨CO₂e，到2030年土地利用、土地利用变化和林业（LU-LUCF）ⁱⁱ 部门能够提供的碳汇量分别为每年19-21亿吨CO₂e和31-33亿吨CO₂e。⁷此外，若碳价为25美元/吨CO₂e，到2030年农业部门每年的减缓潜力约10亿吨CO₂e。¹¹

虽然土地利用部门具有很大的温室气体减缓潜力，对该部门不断增加的需求，如提供粮食、生物质、生物多样性和旅游业等，给土地利用的规划带来了挑战。最近的一项系统文献综述和荟萃分析表明，由于人口增长和饮食结构变化，全球粮食需求将在2010年至2050年间增长35%至56%。⁸在全球层面，农业温室气体排放总量将继续以每年约1%的速度增长，预计到2030年，农业仍将是全球温室气体排放最重要的贡献者之一。^{9,10,11}若要将全球变暖的温度限制在1.5°C，全球AFOLU部门需要贡献2050年所需全球减缓量的30%，即每年15亿吨CO₂e（包括与碳捕获和封存结合的生物能源，即BECCS）。这将需要全球AFOLU部门在生产和消费方面的转型。¹²

2020年9月22日，在第七十五届联合国大会的一般性辩论上，中国宣布将在2060年之前实现碳中和，显示了中国追求经济增长发展新模式的决心。这一转变将是深刻而全面的，但其收益和影响会在各个部门和地区不均衡分布。中国拥有全球近18%的人口，粮食安全是国家社会经济发展战略和政策的重中之重。同时，中国人口已经在近期达到峰值，随着饮食习惯日渐趋向于摄入更多的动物性蛋白质，大多数基准（BAU）情景都预计农业部门非二氧化碳的温室气体排放将增加，这将给中国实现碳中和目标带来挑战¹³。从1994年到2014年，中国农业部门的非CO₂温室气体排放量增加了约37%，而LULUCF部门是净碳汇¹⁴。为了实现中国1.5°C下的排放路径，仅农业部门的温室气体排放必须在2030年达到峰值，LULUCF部门必须继续发挥净碳汇的作用¹⁵。然而，与其他部门(包括能源、交通和工业)不同，目前对中国AFOLU部门减少非CO₂温室气体排放和增强碳汇以及该部门可持续减缓战略、目标和路线图方面的知识还比较有限，需要系统、全面和深入地分析AFOLU部门的长期排放轨迹、时空特征、可能的技术方案、技术和经济减缓潜力，以及AFOLU部门的减缓技术或实践的经济影响。

在此背景下，本报告系统分析了评估中国AFOLU部门未来温室气体排放和清除、减排潜力、土地覆盖变化和农产品生产的经济和生物物理模型，确定了不同模型及其对中国温室气体排放量和清除量的现状评估与预测方面的相似性和关键差异。我们探讨了不同建模工具的关键特征，评估了建模特征（包括关键假设、区域和部门覆盖范围、碳库和气体覆盖范围、以及减缓技术和减缓方案等方面）的潜在差异及其如何影响模型预测结果，并基于该分析确定了中国AFOLU部门未来排放量和清除量的不确定性范围。最后，我们提出了增强相关研究以改进未来模型开发的建议。

i. 农业、林业和其他土地利用（AFOLU）术语包括农业以及土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF）类别。

ii. 根据2006年IPCC指南，LULUCF部门包括与所有土地利用类型——如林地、农田（包括土壤碳库）、草地、湿地、定居地和其他土地——内部变化和之间转换相关通量的报告。该部门还报告与采伐木材产品库变化有关的通量。

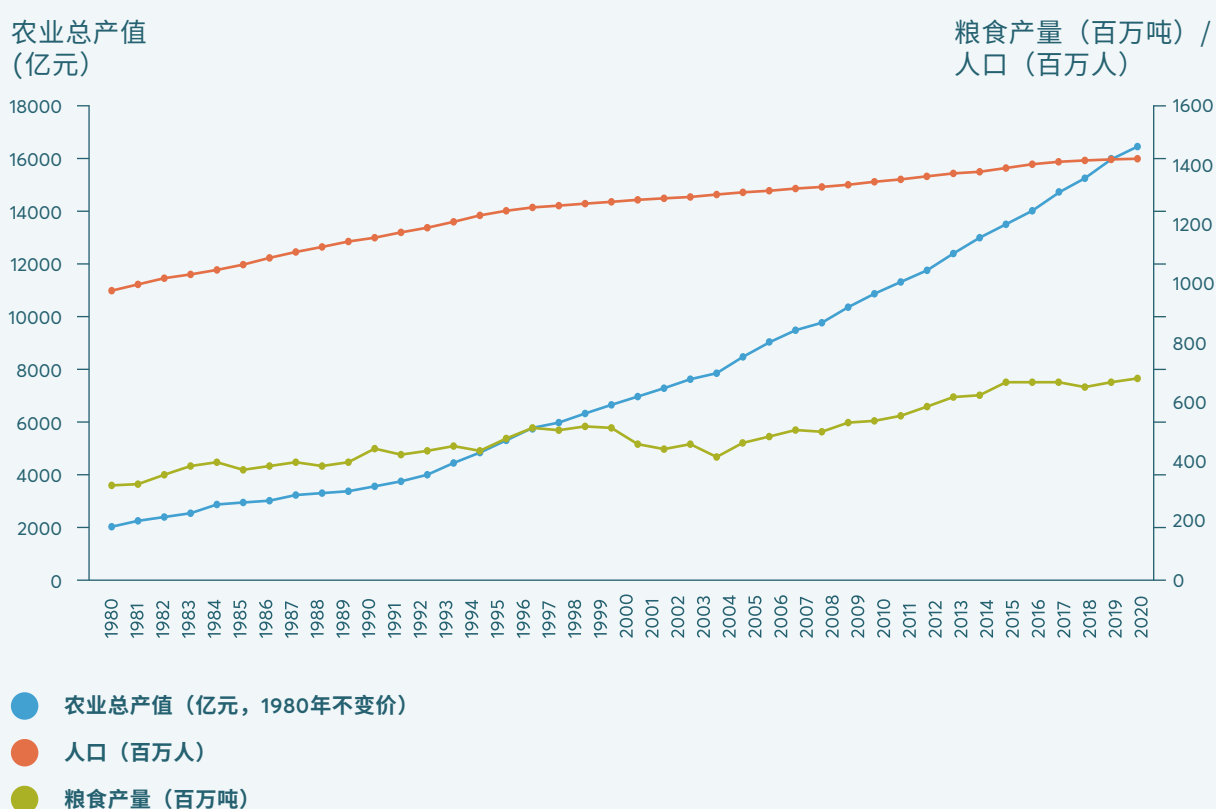
2. 中国农业发展和温室气体排放



中国有悠久的农业历史和精耕细作的传统，且农村人口众多。农业长期以来一直是中国政治和经济稳定的基石，因此中国政府高度重视农业发展。自1978年以来，中国成功地生产了世界四分之一的粮食，用不到世界10%的耕地养活了世界五分之一的人口^{16,17}，这是中国和世界粮食安全的重大成就。目前，中国在谷物、棉花、水果、蔬菜、肉类、家禽、鸡蛋和渔业产品的生产方面居世界第一位，并与世界140多个国家建立了农业交流与合作关系¹⁸。

图1给出了中国农业经济的历史概况。农业部门自1990年以来稳步增长，1997年后增长放缓，但从2003年开始再次增长。自2008年以来，农业对全要素生产率（TFP）的贡献与中国非农业部门持平^{19,20}。2000年至2020年，由于高价值农产品（蔬菜、水果、肉类、牛奶等）的集约化发展，国内粮食产量和农业总产值分别增长了45%和139%（1980年可比价格）²¹。尽管面临新冠肺炎疫情、病虫害和自然灾害的挑战，中国的粮食产量在2020年仍然实现了“17连丰”，粮食产量同比增长0.9%，达到近6700亿公斤。这标志着中国粮食总产量连续第九年超过堪称“大丰收”的6000亿公斤。由于新冠疫情影响了全球很多粮食出口大国，政府非常重视粮食供给的稳定性，2021年的中央“一号文件”更加强调粮食安全，呼吁所有省份在“十四五”期间（2021-2025年）提高粮食产量。

图1: 中国农业部门的历史趋势



数据来源：国家统计局。2022年²²

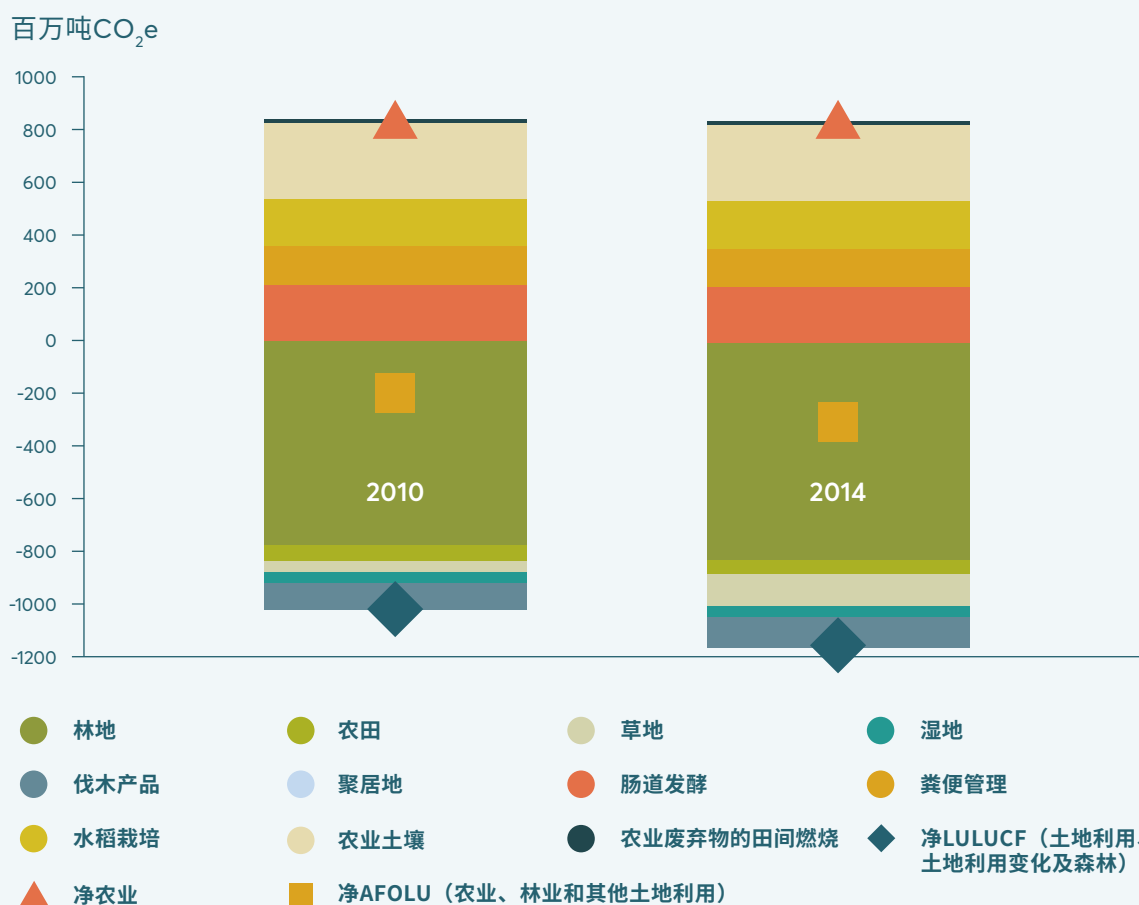
随着农业生产力和收入水平的提高，中国人的饮食结构发生了巨大变化，红肉、禽肉、奶制品和鸡蛋等动物性食品的消费量稳步增加，这对中国的健康和环境构成了重大挑战²³。2019年，中国人均主食（即大米、玉米、小麦和其他谷物）消费量为145.8千克，比1997年下降了33.5%²⁴，而人均水果和肉类消费量大幅增长，在2019年分别达到58.6千克和60.3千克，分别增长了90%和190%²⁵。如果对动物性蛋白的需求继续增加，AFOLU部门将面临着更严峻的脱碳挑战²⁶。

中国的工业化和城市化进程使劳动力、土地和其他重要的农业投入成本日益升高。加之农业规模小和农村人口结构不断变化，中国大宗农产品的生产成本高于美国、加拿大和澳大利亚等主要出口国²⁷。2020年，中国国内大米、小麦和玉米的价格分别达到398.6美元/吨、330.9美元/吨和334.9美元/吨，分别比国际价格高19.1%、78.3%和102.2%。由于存在巨大的国内外价格差异，中国农产品进口的增长已超过正常需求和生产缺口，导致“非必需”食品的进口²⁸。从2001年到2020年，中国包括大豆在内的粗粮进口量从1738万吨增至14255万吨，增长了约7.2倍。由市场驱动的“非必需”农产品进口的增加，不一定能减轻国内农业发展的环境压力，但会对中国农业产业产生负面影响，威胁农民的就业和收入。²⁹

中国也为农业上的成功付出了环境代价。中国农业温室气体排放从1994年的6.05亿吨CO₂e增长到了2014年的8.3亿吨CO₂e，增长了37.2%，目前占全球农业温室气体排放的13%^{30, 31}。同时，由于其他部门排放量的快速增加，农业部门对全国总排放量的贡献从18.7%下降到7.5%。尽管农业会排放温室气体，但LULUCF部门在中国是净碳汇（图2）。快速造林使LULUCF碳汇由1994年的407万吨CO₂e增加到了2014年的1115万吨CO₂e（从最近年份的可获得官方数据）。在农业排放源中，反刍动物的肠道发酵是甲烷（CH₄）排放的最大来源，农业土壤是氧化亚氮（N₂O）排放的最大来源。2014年，肠道发酵、粪便管理、水稻种植、农业土壤和农业残留物的田间燃烧产生的温室气体排放量分别为2.07亿吨CO₂e、1.39亿吨CO₂e、1.87亿吨CO₂e、2.88亿吨CO₂e和0.09亿吨CO₂e，分别占农业源排放总量的24.9%、16.7%、22.5%、34.7%和1.1%。



图2: 中国2010年和2014年AFOLU温室气体排放和清除构成



数据来源: Government of China, 2018³²; Government of China, 2016³³; Government of China, 2018³⁴.

3. 方法和数据



为确保对中国AFOLU部门模型及其温室气体排放和预测比较的一致性，国际应用系统分析研究所（IIASA）和中国人民大学的研究人员开发了两个标准化报告模板，旨在以标准化方式收集中国模型和温室气体预测的主要特征。

“建模特征模板”主要关注模型本身的关键特征，旨在促进对不同模型的特征差异及其对模型预测结果影响的理解。该模板包括碳汇和温室气体的覆盖范围、土地利用类别代表性、土地利用变化可核算性、模型模拟的区域、模型部门覆盖范围等方面。

“预测模板”旨在提高我们对现有预测的理解。该模板允许项目合作伙伴报告2010年至2100年对关键变量的预测，如土地利用变化、碳汇和温室气体的变化、食物和饲料生产以及粮食安全等模型核算的其他指标。

为了让模型团队顺利地填写模板，确保对模型关键特征的高质量分析，两者都包括了大量说明和填报示例。开发完成后，两个模板被分发给项目合作伙伴来验证和阐明任何不确定性。所有项目合作伙伴都有所贡献，并为改进模板提供有价值的见解和想法。

报告模板完成并通过测试后，我们联系了10个国内外关键建模团队，包括综合评估模型、AFOLU部门模型和特定AFOLU子部门模型的团队，听取他们的意见。基于对中国现有建模格局的摸底调查，我们选择了10个关键建模团队，重点关注开展了中国AFOLU部门温室气体排放和碳汇长期（到2050/2060年）情景分析的模型（各模型的报告年份不同）。因此，本文共评估了8个模型：GLOBIOM-中国、MAgPIE-中国、G-CAM5.3、FABLE Calculator-中国、ORCHIDEE、PECE-LIU、AGHG-INV和SRNM。其他可能的候选模型——如DNDC、APSIM和CENTURY/DayCent——由于无法及时为本研究提供长期预测，因此未包括在本次评估中。报告模板于2021年9月前发给所有建模团队。之后，我们直接与各建模团队开展了充分交流，阐明并进一步解释如何在两个报告模板的填写中反映模型假设的细节。

8个建模小组全部填写并报告了建模特征模板，5个建模小组提交了预测模板。应当指出的是，各建模小组提交了各自的最新预测结果。但是，各建模小组没有统一基本数据来源（如排放系数、土地利用、减缓方案）或其预测的主要驱动因素（如社会经济发展、气候变化、国际贸易、国家/国际政策）。关于各模型的细节可见附件一。

4. 模型的覆盖范围方面有何不同？



4.1. 土地利用类别的系统边界和覆盖范围

基于建模团队报告的信息，我们初步评估了目前的对中国的建模能力现状（表1）。在本节中，我们首先讨论了包括LULUCF部门的模型覆盖范围(GLOBIOM-中国、MAgPIE-中国、GCAM5.3、FABLE Calculator-中国、ORCHIDEE和PECE-LIU)，然后讨论了覆盖农业部门的模型（GLOBIOM-中国、MAgPIE-中国、GCAM5.3、FABLE Calculator-中国、AGHG-INV和SRNM）的覆盖范围。

六种模型覆盖了LULUCF的全部或部分领域，重点是林地、农田、草地和“其他土地”（表2）ⁱⁱⁱ。根据2014年中国国家温室气体排放清单³⁵，这四种土地利用类型占中国土地总面积的90% (675.29 Mha)。所有模型都考虑了林地的发展，只有一个模型(PECE-LIU)不考虑农田或草地。4个模型（GLOBIOM-中国、MAgPIE-中国、GCAM5.3和FABLE Calculator-中国）考虑了其他陆地(73.63 Mha)的开发情况。然而，湿地(39.73万公顷)和定居地(37.23万公顷)的关注度较低。在参加比较的模型中，只有MAgPIE-中国模型包含了湿地，只有GCAM5.3和FABLE-Calculator-中国模型考虑了定居地。^{iv}

在考虑林地的六个模型中，有三个模型区分受管理和未受管理林地。在考虑草地的五种模型中，有两个模型区分了受管理和未受管理草地。MAgPIE-中国是唯一考虑湿地的模型，它还区分了受管理和未受管理湿地。从2014年中国国家温室气体排放清单中无法检索到不同土地利用类别下受管理和未受管理土地的划分情况。

因此，现有模型在其范围和对中国主要土地利用和农业部门的主要特征体现上存在差异。此外，覆盖LULUCF部门的模型没有一个涵盖了所有土地利用类型。

iii. 根据2006年IPCC《国家温室气体排放清单指南》，“其他土地”包括裸露的土壤、岩石、冰和所有不属于其他五种主要土地利用类别的土地区域，即林地、农田、农业、草地和定居地。

iv. 在MAgPIE-中国中，定居地被视为静态。

表1. 模型主要特点比较						
模型名称	AFOLU部门覆盖	方法学	地理覆盖范围	目的	预测的基准年	时间范围和时间步骤
GLOBIOM-中国	农业和LULUCF	部分均衡模型	多区域	预测	2010	长期, 时间步长为10年, 直到2100年
MAgPIE-中国	农业和LULUCF	部分均衡模型	多区域	预测	2010	长期, 时间步长为5年, 直到2100年
GCAM5.3	农业和LULUCF	部分均衡模型	多区域	预测	2015	长期, 时间步长为5年, 直到2100年
FABLE Calculator-中国	农业和土地利用变化*	无优化的均衡模型	全国	预测、政策模拟	2000	中期, 时间步长为5年, 直到2050年
ORCHIDEE	LULUCF	基于过程的模型	多区域	预测、回溯、政策模拟	2015**	长期, 时间步长为1年, 直到2100/2300年
PECE-LIU	林业部门	优化模型	全国	预测	2010	中期, 时间步长为5年, 直到2060年
AGHG-INV	农业	清单	全国	预测	2018	长期, 时间步长为1年, 直到2050年
SRNM	种植系统	统计模型	全国	回溯	2017	长期

* The FABLE Calculator-中国模型考虑了土地利用变化(LUC), 但没有考虑与现有土地利用或森林管理相关的温室气体通量。

** ORCHIDEE模型在不同的情景中有所不同; ORCHIDEE模型估算基于CMIP6, 未来气候开始于2015年。

表2. 不同模型土地利用覆盖范围及其土地面积估计值的比较							
数据/模型	2014年土地面积 估算(亿公顷) ³⁶	GLOBIOM- 中国	MAgPIE- 中国	GCAM5.3	FABLE Calculator- 中国*	ORCHIDEE	PECE-LIU
林地总量(即受 管理+未受管理)	1.8004**	×	×	×	×	×	×
林地(受管理)		×	×	×			
林地(未受管理)		×	×	×			
农田	1.3506	×	×	×	×	×	
草地总量(即受 管理+未受管理)	2.8656		×	×		×	
草地(受管理)		×		×	×	×	
草地(未受管理)				×		×	
湿地总数(即受 管理+未受管理)	0.3973		×				
湿地(受管理)			×				
湿地(未受管理)			×				
定居地	0.3723			×	×		
其他土地	0.7363**	×	×	×	×		

* 在FABLE Calculator-中国中, 目前还没有包括草地转为农田的排放量和农田转为草地的排放/固碳量。然而, 它考虑了废弃农田发生的碳固存。

** 根据2014年国家温室气体排放清单提供的信息, 森林用地被计算为乔木林、竹林和疏林的总和。“其他土地”被计算为灌木林地。

4.2. LULUCF碳库的覆盖范围

温室气体的覆盖范围和用于估计排放量和清除量的方法因模型而异。我们评估了六个模型对LULUCF部门、不同土地利用类别的覆盖情况，也分析了计算每一类碳库的IPCC层级方法（表3）^v。

我们发现，所有模型团队都高度关注与林地相关的碳库（包括林地、剩余林地和转化为林地的土地）（表3）。相比之下，湿地、定居地、其他土地和木质林产品（HWP）相关的碳库受到的关注少得多。在土壤碳库方面，模型更注重展示无机土壤，而不是有机土壤。在覆盖土地利用部门的6个模型中，只有两个（ORCHIDEE和GCAM5.3）考虑了LULUCF部门的CH₄和N₂O的排放源和碳汇去除（表3）。

不同模型用于计算特定碳库变化的IPCC层级方法存在很大差异（表3）。然而，应用的方法也有规律可循。例如，层级3方法主要用于计算与林地有关的碳库。对于活生物量的碳储量变化，除了FABLE Calculator-中国模型外，所有模型都采用了层级3方法。FABLE Calculator-中国模型采用了层级2方法计算绿化土地和废弃农田的碳库（不考虑管理森林中活生物量的变化）。就枯木、凋落物和死有机质的碳储量变化而言，代表这些碳库的四个模型都使用了层级3方法。

对于湿地和定居地的碳库，主要使用层级1和层级2方法。土壤碳库主要应用层级1和层级2方法。唯一的例外是ORCHIDEE模型，它对林地、农田和草地的土壤碳库应用了层级3方法。

v. 根据IPCC清单指南（2006, 2019），用于估算温室气体通量的方法通常分为3个层级，其中层级通常代表方法的复杂性水平。层级1是基本方法，通常使用IPCC推荐的默认值；层级2则采用特定国家的排放系数；层级3估计在复杂性和数据要求方面要求更高。层级2和层级3有时被称为更高层次的方法，只要有足够的开发、评估数据，通常被认为更准确。

表3. 模型对碳库的覆盖范围和计算碳库变化的层级方法								
模型中的土地利用	单位面积生物量碳储量变化			单位面积枯木净碳储量变化	单位面积凋落物净碳储量变化	单位面积死有机质净碳储量变化	单位面积土壤净碳储量变化	
	收益	损失	净变化				矿物土壤	有机土壤
林地	O	O	O, P	O	O	NA	O	O
林地仍为林地	GC	GC	GC	GL, M	GL, M	NA	GC	GC
	GL, M	GL, M	GL, M					
转为林地的土地	GC	GC	GC	GL, Z	GL, Z	NA	GL, M	M
	GL, M	GL, M	F				GC	GC
			GL, M					
农田	O	O	O	NA	NA	O	O	O
农田仍为农田	GC	GC	GC	NA	NA	NC	GC	GC
转为农田的土地	GC	GC	F	NA	NA	NC	GL, M	M
		M	GC				GC	GC
草地	O	O	O	NA	NA	O	O	O
草地仍为草地	GC	GC	GC	NA	NA	NC	GC	GC
转为草地的土地	GC	GC	GC	NA	NA	NC	GL, M	M
			F					
	M	M	M				GC	GC
湿地	NC	NC	NC	NA	NA	NC	NC	NC
湿地仍为湿地	M	M	M	NA	NA	NC	NC	NC
转为湿地的土地	M	M	M	NA	NA	NC	M	M
定居地	NC	NC	NC	NA	NA	NC	NC	NC
定居地仍为定居地	GC	GC	GC	NA	NA	NC	GC	GC
转为定居地的土地	GC	GC	GC	NA	NA	NC	GC	GC
			F					
其他土地	NC	NC	NC	NA	NA	NC	NC	NC
其他土地仍为其他土地	NA,M	NA,M	NA,M	NA	NA	NA	NA	NA
转为其他土地的土地	M	M	GC	NA	NA	NC	G	NC
			F					
			M					
木质林产品	O	O	O	NA	NA	NA	NA	NA

- 层级3 (T3)
- 层级2 (T2)
- 层级1/2 (T1/2)
- 层级1 (T1)

注：NA = 不适用；NC = 未被任何模型涵盖；GL = GLOBIOM-中国；M = MAgPIE-中国；GC = GCAM5.3；F = FABLE Calculator；O = ORCHIDEE；P = PECE-LIU。方法代码T1、T2和T3分别代表层级1、2和3方法。T1 / T2表示模型采用T1和T2方法组合计算碳储量变化。

4.3. 模型中LULUCF的覆盖范围 vs. 国家温室气体排放清单

由于没有一个模型涵盖了LULUCF部门所有的土地利用类型，因此本报告评估了不同模型评估的LULUCF排放占中国温室气体排放和清除的比重。即回答：到目前为止，这些模型是否关注了中国温室气体排放最重要的土地利用部门呢？用于编制中国2014年国家温室气体排放清单的层级方法³⁷与建模工具使用的层级方法是否存在较大差异？

比较模型覆盖范围与中国主要排放源和清除源时（表4），总体而言，模型确实很好地覆盖了当年大多数的主要来源（林地、草地和农田），但木质林产品除外。只有一个模型涵盖木质林产品（ORCHIDEE），只有一个模型涵盖了湿地（MAGPIE-China），两者都是相对较大的碳汇，且在国家温室气体排放清单中已经为中国制定了国家特有的排放因子。有趣的是，尽管“其他土地利用”类别在中国目前的温室气体排放和清除中并不算重要，6个模型中有4个考虑了这一类别。然而，在模型中包括这一土地利用类别确实能更完整地展示当前的土地利用和土地利用变化。因此从建模的角度来看，考虑这个类别是有意义的。

表4. 评估模型与中国2014年全国温室气体排放清单对土地利用类别和CO ₂ 碳源/碳汇覆盖范围的比较					
土地利用类别	评估模型		中国2014年温室气体排放清单的方法 ³⁸		
	模型覆盖比率	层级方法	层级方法	排放因子	2014年排放/清除量 (万吨)
林地	6/6	T1/T2/T3	T2	CS	-83773
农田	5/6	T1 / T2 / T3	T3	CS	-4946
草地	5/6	T1 / T2 / T3	T2	CS	-10916
湿地	1/6	T1	T2	CS	-4454
定居地	2/6	T1 / T2	T2	CS	253
其他土地	4/6	T1 / T2 / T3	T1	D	0
木质林产品	1/6	T1	T2	CS	-11055

注：方法代码T1、T2和T3分别代表层级1、2和3方法。CS = 中国的国别排放因子；D = 默认IPCC排放因子。*应当指出的是，没有区分全部或部分涵盖某土地利用类别的模型。例如，FABLE Calculator-中国只计算了模型运行时间尺度内的林地，而不是中国境内的所有林地。关于模型对不同土地利用类型的覆盖情况的细节见表2。

4.4. 农业非二氧化碳温室气体排放与国家温室气体排放清单的对比

我们从六个模型（GLOBIOM-中国、MAgPIE-中国、GCAM5.3、FABLE Calculator-中国、AGHG-INV和SRNM）中收集了农业部门非二氧化碳温室气体排放的数据。除SRNM外，其他所有模型都考虑了非二氧化碳温室气体排放的主要农业来源，这五个模型之间有很大的相似性（表5和表6）。他们都采用了IPCC的清单框架，并考虑了农业非二氧化碳温室气体排放的最关键来源——肠道发酵、粪便管理和水稻种植的CH₄排放；以及肠道发酵、粪便管理和农业土壤中的N₂O排放。然而，只有AGHG-INV包括骆驼、马和骡子等其他大型牲畜的排放。GLOBIOM-中国不包括农业残留物燃烧产生的N₂O。除了这五个模型外，SRNM还关注了施用氮肥后农田N₂O排放量的变化，并且只考虑了农田土壤N₂O排放和粪便的部分排放（即畜禽粪便作为有机肥返回农田的部分排放）。

不同模型在计算农业部门的温室气体排放量时，主要使用层级2方法。全部五个模型在所有重要畜禽和农业用地类型中都采用了中国特有的排放因子。然而，对一些不同重要的排放源（例如骆驼），也采用了IPCC默认因子。该部门评估，尤其是开展了中国AFOLU部门未来长期情景的评估模型，很少使用层级3方法。在过去二十年中，中国开展了大量研究，监测和评估水稻种植、不同类型旱地以及畜禽养殖活动的排放因子，这为建模研究奠定了良好的基础。虽然在中国开展了水稻种植和农业土壤层级3的清单研究，但它们在开展长期的温室气体排放情景分析时面临较大挑战。³⁹

表5. 评估模型和中国2014年国家温室气体排放清单中CH₄源和汇类别的比较

土地利用类别	评估模型		中国2014年温室气体排放清单的方法 ⁴⁰		
	模型覆盖比率	层级方法	层级方法	排放因子	2014年排放/清除量(万吨)
肠道发酵	5/6	主要是T1/T2, 部分T3	T2	D, CS	985.6
粪便管理	5/6	T1/T2	T2	D, CS	315.5
水稻栽培	5/6	T1/T2/T3	T3	CS	891.1
农业土壤	5/6	NA	NA	NA	NA
农业残留物的田间燃烧	4/6	T1	T1	D, CS	32.3

注：方法代码T1、T2和T3分别代表层级1、2和3方法。CS = 中国的国别排放因子；D = 默认IPCC排放因子；NA = 不适用。

表6. 评估模型和中国2014年国家温室气体排放清单中N₂O源和汇类别的比较

土地利用类别	评估模型		中国2014年温室气体排放清单的方法 ⁴¹		
	模型覆盖比率	层级方法	层级方法	排放因子	2014年排放/清除量(万吨)
粪便管理	6/6	T1/T2	T2	D, CS	23.3
农业土壤	6/6	T1/T2	T2	D, CS	93
农业残留物的田间燃烧	4/6	T1	T1	D, CS	0.7

注：方法代码T1、T2和T3分别代表第1、2和3层方法。CS = 中国的国别排放因子；D = 默认IPCC排放因子。

5. 不同模型的预测差异如何？



5.1. LULUCF部门的预测

五个建模团队为本次评估提交了对LULUCF部门的预测（GLOBIOM-中国、MAgPIE-中国、GCAM5.3、FABLE Calculator-中国和PECE-LIU）。这些模型在预测基准年（表7和表8）以及LULUCF部门的预期发展路径（图3）的假设上都存在很大差异。LULUCF部门温室气体排放和清除水平的基准年从2014年到2016年不等，只有PECE-LIU模型显示的温室气体排放和清除水平与中国最新的2014年国家温室气体排放清单相对一致⁴²。这并不奇怪，因为PECE-LIU模型的校准基础2006年和2016年国家森林资源清查和中国国家温室气体排放清查数据。

GLOBIOM-中国和GCAM5.3模型均表明LULUCF部门在2015年是净碳汇，但碳汇规模远小于中国2014年国家温室气体排放清单的估计（图3和表7）。相比之下，MAgPIE-中国和FABLE Calculator-中国模型均表明LULUCF部门在2015年是净排放源。在MAgPIE-中国模型中，这主要是由草地的大量排放驱动的（图3和表7）。同时，FABLE Calculator-中国仅展示了与土地利用变化相关的人为排放和清除，忽略了与当前土地利用相关的排放和清除。例如，该模型考虑了再造林/造林事件造成的碳固存和随着时间推移时碳固存的积累，但没有考虑林地或仍为林地的碳库的进出通量。

表7. 模型估计的年度温室气体排放/清除量与2014年国家温室气体排放清单的比较(亿吨CO ₂ e/每年)						
模型名称	2014年国家温室气体排放清单 ⁴³	GLOBIOM-中国	MAgPIE-中国	GCAM5.3	FABLE Calculator-中国	PECE-LIU
年份	2014	2015	2015	2015	2015	2016
LULUCF合计	11.2	3.12	1.33	1.36	1.85	-9.34
林地	8.38	3.90	14.0		-2.96	-9.34
农田	0.50	0.78	0.38		0.07	NC
草地	1.09	0.00	13.47		4.6	NC
湿地	0.45	NC	0.53	NC	NC	NC
定居地	0.00	NC	NC		0.15	NC
其他土地	0.00	NC	1.68		0	NC
木质林产品	1.11	NC	NC	NC	NC	NC

注：NC =未涵盖。这表明该模型不涵盖该土地利用类别的碳库。

表8. 模型中土地利用面积估值与2014年国家温室气体排放清单的比较 (亿公顷)						
模型名称	2014年国家温室气体排放清单 ⁴⁴	GLOBIOM-中国	MAGPIE-中国	GCAM5.3	FABLE Calculator-中国	PECE-LIU
年份	2014	2015	2015	2015	2015	2016
LULUCF合计林地	1.8004*	2.1192 (1.0458)	2.0040 (NR)	1.4047 (1.0206)	2.1029 (1.77)	2.2045 (0)
农田草地	1.3506	1.4888 (NR)	1.1190 (NR)	1.1600 (NR)	1.2241 (122.11)	NC
湿地定居地	2.8656	2.0596 (0.9457)	3.7494 (NR)	5.5111 (4.5647)	4.1185 (3.8604)	NC
其他土地木质林产品	0.3973	NC	0.0335 (NR)	NC	NC	NC
其他土地木质林产品	0.3723	NC	0.0599 (NR)	0.0599 (NR)	0.0567 (0.0511)	NC
其他土地木质林产品	0.7363*	3.8929 (3.8929)	2.292 (NR)	1.1574 (NR)	1.9231 (1.9231)	NC

注：据模型估算，土地面积报告为总土地。括号内的数字是假设在排放量和清除量方面保持中和的土地面积，即在二氧化碳净零排放状态下，该地区的二氧化碳排放量和从大气中吸收的碳之间平衡。NC=未涵盖（当模型不包括土地利用类别的碳库时使用）。NR=未报告（当建模团队选择不报告估算值时使用）。

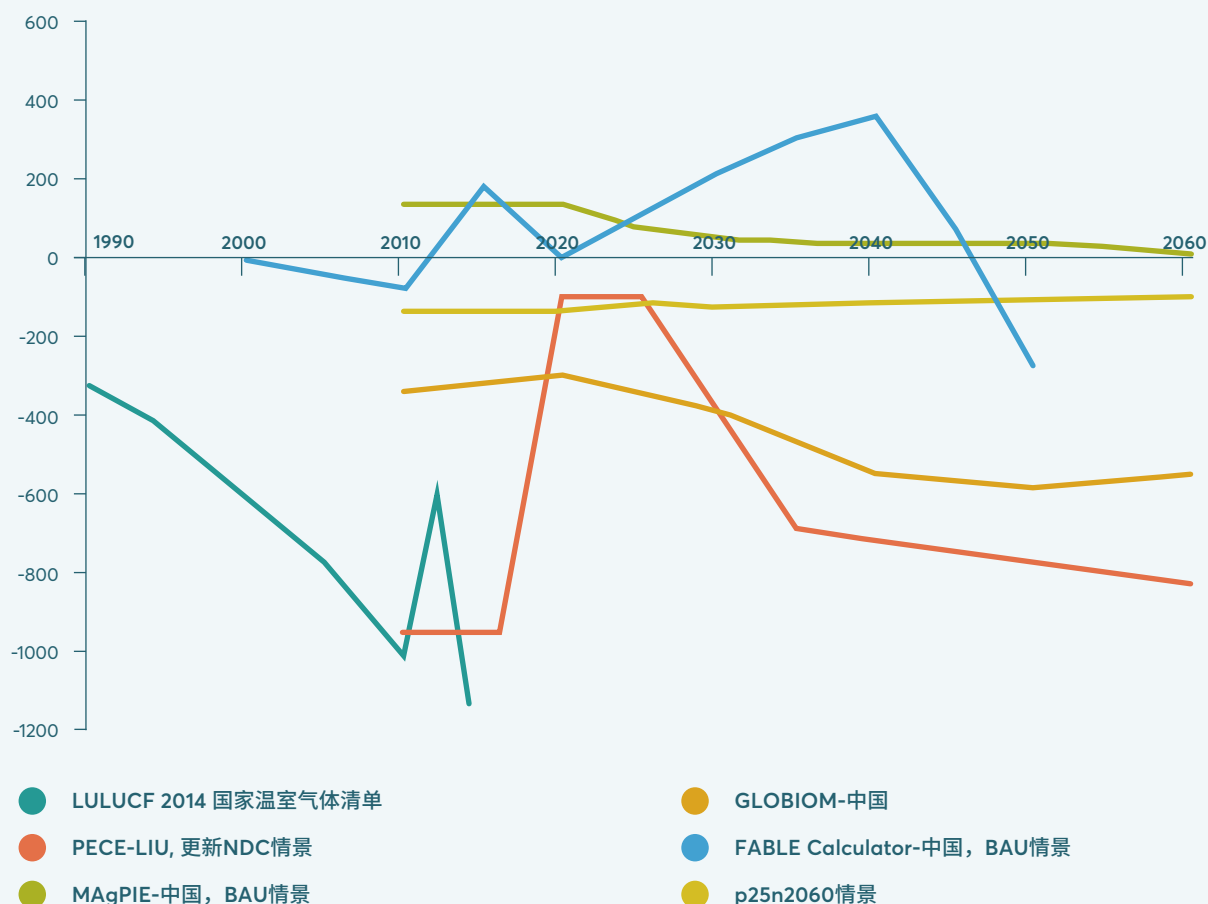
* 根据2014年国家温室气体排放清单提供的信息，林地被计算为乔木林、竹林和疏林的总和。“其他土地”已计算为灌木林地。

虽然GCAM5.3、GLOBIOM-中国和MAGPIE-中国都很好地覆盖了历史温室气体排放/清除最重要的土地利用类别（表2和表5），并使用了与中国国家温室气体排放清单相对一致的层级方法，三种模型与国家温室气体排放清单在2010-2020年期间报告值仍存在巨大差异。模型与国家温室气体排放清单之间的最大差异主要与林地、木质林产品、农田和草地有关（表7）。根据2014年中国国家温室气体清单，2014年林地的净碳汇为-8.37亿吨CO₂e。然而，模型对2015年碳汇规模的估计在-14.69亿吨CO₂e和-3.89亿吨CO₂e之间变化。由于模型和温室气体排放清单之间的林地面积相对一致（表8），这些差异可以由用于计算碳汇规模的活动数据、排放因子和数据源的差异来解释（即森林生长函数、不同树种的表示、当前年增量、林龄结构、受管理与未受管理土地等）。此外，这些模型可能使用不同的数据源表示历史造林和森林砍伐趋势。例如，GLOBIOM-中国的历史造林和森林砍伐趋势通常与联合国粮农组织（FAO）的森林资源评估2020年的数据集一致，该数据集可能与中国向《联合国气候变化框架公约》报告的国家温室气体排放清单所用的数据不同。

GLOBIOM-中国、FABLE Calculator-中国和MAGPIE-中国都预计LULUCF部门的净温室气体排放量将减少，而长期的清除量将增加（即到2050/2060年与2000/2010年相比）。温室气体净排放量的预期减少分别为：MAGPIE-中国的1.09亿吨CO₂e、GLOBIOM-中国的2.06亿吨CO₂e、FABLE Calculator-中国的2.66亿吨CO₂e（图3）。GCAM5.3和PECE-LIU模型预测，尽管与当前水平相比，碳汇略有减少（到2060年介于0.34至1.2亿吨CO₂e），但LULUCF部门总体上仍是碳汇。预测的差异可能与情景对变化驱动因素假设的差异有关，但基于这些模型类别千差万别，这也与模型类型的根本差异有关。

图3: LULUCF部门的历史和预测温室气体排放和清除情况

百万吨CO₂eq/年



注： 预测包括来自GLOBIOm-中国、FABLE Calculator-中国、MAgPIE-中国、GCAM5.3和PECE-LIU的情景。每个情景的详细信息见附件二。LULUCF历史温室气体信息来自《2012年中华人民共和国国家通报》⁴⁵以及《中华人民共和国第一次两年更新报告》（2016年）⁴⁶和《中华人民共和国第二次两年更新报告》（2018年）。⁴⁷

在对LULUCF部门的预测中，虽然GLOBIOm-中国、GCAM5.3和MAgPIE-中国模型设想未来中国LULUCF部门碳汇的发展相对平稳，但FABLE Calculator-中国和PECE-LIU模型预测的净排放量将随时间的强烈波动（图3）。PECE-LIU预测，由于森林碳储量增长率和国家造林率下降，2016年至2025年期间LULUCF部门的碳汇将下降。与其他模型预测不同，PECE-LIU模型的预测纳入了中国最新土地利用和政策目标，并假设这些目标都能实现^{vi}。该情景预测，实现这些目标将导致2016年至2025年期间森林蓄积量增长率下降（与上一个报告期相比），随后森林碳汇的作用将大幅减小。此外，中国的植树造林步伐预计将放缓，因为最适合的地区已经开展了植树造林，导致未来工作将转向国内造林更具挑战性的地区。

vi. 其预测基于两个主要文件：一份由中国共产党中央委员会和国务院发布（2021），涵盖2025年至2030年，另一份由国家林业和草原局（2019）发布，涵盖2035年至2050年。其中包括森林覆盖率达到24.1%（约2.3亿公顷）和森林蓄积量达到190亿立方米的目標。

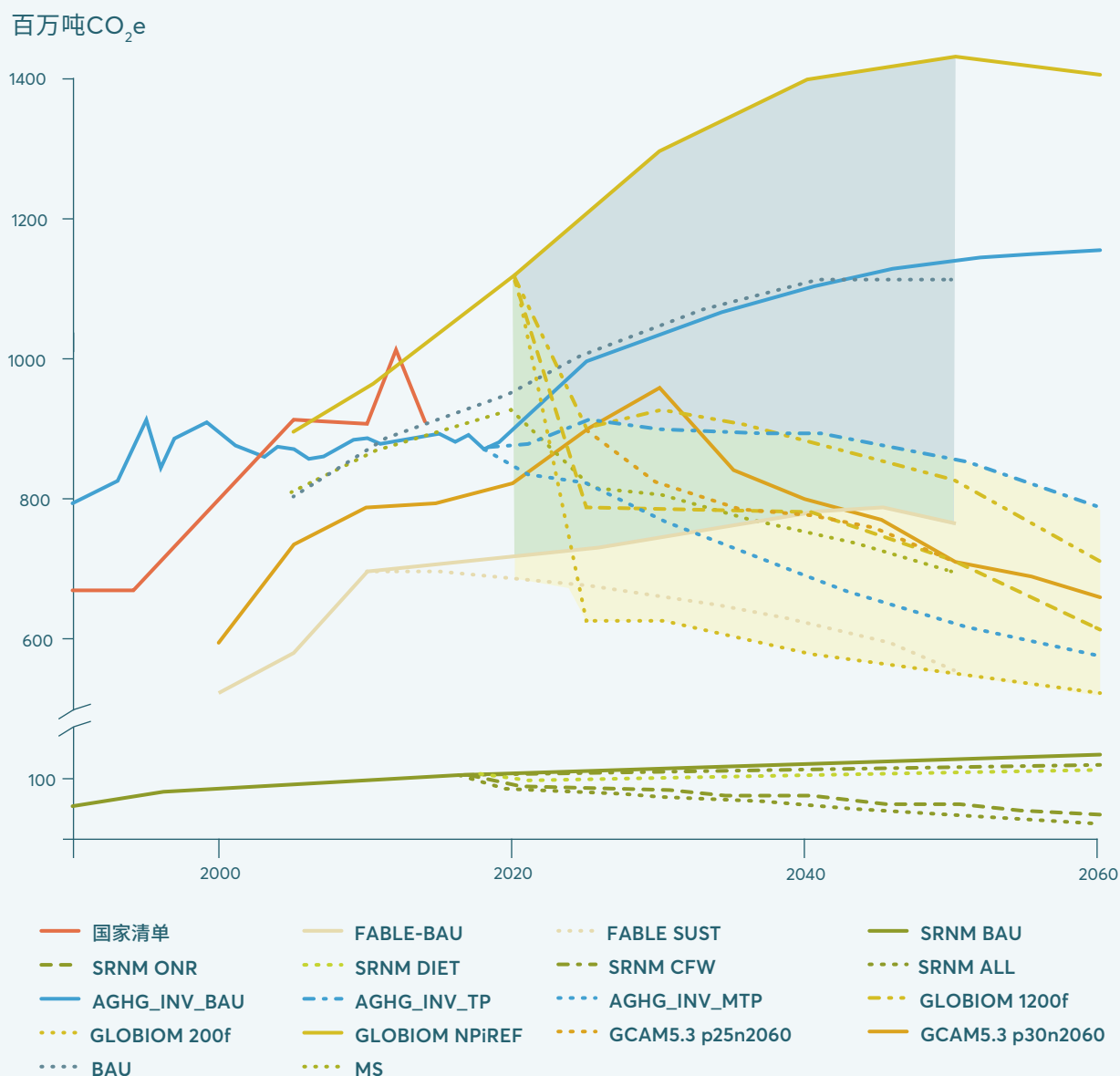
5.2. 对农业部门的预测

根据中国国家温室气体排放清单和模型结果（图4），2000年农业部门的非二氧化碳温室气体排放量为6.38亿吨CO₂e，到2020年，这些排放量将增加到9.5亿吨CO₂e，其范围在7.11亿吨和11.18亿吨CO₂e之间。对于基准年，非二氧化碳温室气体排放的不确定性范围约为50%，大多数模型提供的结果是从2000年到2050年。在SRNM的估计中，仅包括种植业的排放，因此结果只是其他模型估计的一小部分。然而，对于该子类别，不同模型的结果似乎很稳健，与国家清单和AGHG-INV模型对农作物种植排放（包括水稻种植和农业土壤）的估计误差在12%以内。

在基准（BAU）情景下，大多数模型预测中国农业部门的非二氧化碳排放量将在2030年后仍然缓慢增长，并在2045年至2060年达到峰值。峰值排放预估的范围为7.6亿吨CO₂e（FABLE-calculator）到14.34亿吨CO₂e（GLOBIOM-中国）（图4）。这些差异来自于基准年、模型结构、情景假设和参数选择的差异。各模型在2050年的最大减缓潜力平均为每年4亿吨CO₂e（范围为2-8亿吨CO₂e）。最乐观的减缓潜力估计来自GLOBIOM-中国模型，到2050年的预估的减缓潜力范围在6亿吨至9亿吨CO₂e之间，部分原因在于该模型具有最高的BAU排放量（2050年为14.34亿吨CO₂e）。GCAM没有报告BAU情景，而是在两种不同情景下模拟了中国农业温室气体排放的两条轨迹，即全国温室气体排放总量在2025年和2030年达到峰值情景下的排放轨迹。在2030年达峰的情景下，中国农业温室气体排放预计将达到9.57亿吨CO₂e的峰值；而在2025年达峰的情景下，中国农业温室气体排放将达到8.95亿吨CO₂e的峰值，然后下降，比2030年达峰情景的峰值排放量低7%。然而在GCAM两种达峰情景下，2060年的排放量持平，约为6.53亿吨CO₂e。



图4: 1990-2060年中国农业历史和预测的非二氧化碳温室气体排放量



注：预测包括来自GLOBIOM-中国、GCAM5.3、FABLE Calculator-中国、AGHG-INV和SRNM的情景（仅适用于农业N₂O排放）。农业温室气体历史信息由《2012年中华人民共和国国家通报》⁴⁸，以及2016年和2018年的《中华人民共和国第一次两年更新报告》（2016）⁴⁹和《中华人民共和国第二次两年更新报告》（2018）⁵⁰汇编。每个场景的详细信息可见附件二。灰色阴影区域表示不同模型估计的“一切照旧”（BAU）范围。绿色阴影区域表示不同模型估计的减缓潜力范围。BAU和减缓情景是BAU预测和所有减缓情景（MS）的平均值。由于SRNM仅涵盖种植业部门，因此未包括在BAU和MS的计算中。

6. 知识差距和改进模型的建议



本报告发现，现有模型对中国历史和未来LULUCF相关排放和清除的预测存在较大的不确定性。不同模型之间的历史净排放量差异非常显著（11.19亿吨CO₂e，图3）。该不确定性相当于2014年中国全国温室气体汇的估计规模（11.50亿吨CO₂e）。模型之间一定程度的差异可以用范围、结构、输入数据、土地利用覆盖范围、碳库覆盖范围、活动数据和排放因子的差异来解释。为了与中国国家温室气体排放清单保持一致，在协调和改进模型方面仍有很多工作要做⁵¹。正如文献指出和强调的那样，方法和数据协调是世界上许多国家模型研发中面临的重要问题。由于所有国家都将使用新的通用报告表（CRTs）来报告其2024年之后的国家温室气体清单，建议中国开展研究并制定新的惯例和方法来使其基准和预测与CRTs的要求相协调。

对中国土地利用模型的回顾表明，其中相当多的土地利用模型一定程度上涵盖了林地（6/6）、农田（5/6）和草地（5/6）等类别，从2014年的中国国家温室气体排放清单中可以看出，这些类别对于当前LULUCF排放水平和减缓潜力的代表性方面至关重要⁵²。然而它们也存在局限性。例如，只有一个模型涵盖了木质林产品碳库，而目前它是中国国家温室气体排放清单中的第二大碳汇（-1.11亿吨CO₂e）。此外，目前只有两种模型涵盖定居地，只有一种模型涵盖湿地。虽然在中国国家温室气体排放清单中，上述两种土地利用目前都不是LULUCF部门的重要人为排放和清除来源，但目前大量文献指出，通过保护和恢复湿地⁵³以及发展绿色城市基础设施等活动，它们可以展示相当高的减缓潜力和多重协同效益^{54, 55}。因此应在不同的模型工具中纳入这些土地利用并评估其减缓潜力。

与其他部门相比，LULUCF部门在人为温室气体排放估计方面不确定性较高^{56, 57, 58}。例如，在中国2014年清单中，各行业的不确定性水平为：能源5.2%；工业过程3.9%；农业19.8%；LULUCF21.2%，荒地23.2%⁵⁹。然而，之前的评估强调，完善优先领域的评估方法⁶⁰可以极大提高LULUCF评估的准确性^{61, 62}。希望完善LULUCF温室气体评估方法的国家可以从现有研究和数据收集中受益，以改进最不确定的模型评估部分。

基于我们的评估，本研究强调优先采取以下行动改善中国AFOLU部门的建模：

- **加强模型开发方面的合作：** 模型开发人员和国家温室气体排放清单编纂者之间加强合作，将有助于完善未来人为温室气体排放预测的基础数据。模型间比较、模型验证和协同工作能减少不确定性、改进预测。在AFOLU部门，需要进行更多的跨部门工作，尤其要注意协调模型的不一致性、BAU假设和减缓情景假设，并评估与该部门相关的政策的潜在影响。
- **共享并开放数据访问：** 共享数据源是改进模型校准和降低模型不确定性的关键。通过免费提供中国国家温室气体排放清单的排放因子和活动数据集，以及不同建模团队的数据集，不仅可以校准模型，而且能够增强模型结果的透明度。
- **提升多模型比较：** 建议每个模型团队详细地公开预测数据，并建立系统机制来比较不同模型和研究，这能使各国和国际利益攸关方了解减缓途径，获得对建模结果的信心，并将这些发现纳入决策中。

此外，为了开发技术上可行的与2°C/1.5°C目标兼容的AFOLU部门排放路径，并为该行业开发符合中国碳中和目标和《巴黎协定》的路径，我们敦促决策者资助以下研究活动：

- **瞄准最不确定的领域：** 全球AFOLU部门的高度不确定性可能会降低减排的国际信心，特别是对那些期望森林和农业为近期温室气体减排做出重大贡献的国家。
- **纳入更多减缓方案和具有大规模减排潜力的部门：** 将被忽视的部门(如湿地和定居地)纳入各种建模工具，有助于消除模型之间的差异，从而更准确地评估AFOLU部门的未来排放量。此外，通过将低成本但高潜力的减缓方案纳入各种建模框架，模型可以考虑更全面的减缓方案，并帮助决策者建立更全面的减缓途径。

附件一: 模型描述

GLOBIOM-中国

全球生物圈管理模型（GLOBIOM）是具有双边贸易流和成本的农业、林业和生物能源部门的经济局部平衡模型，有动态递归^{vii}、空间明确等特点。该模型基于详细网格单元信息，遵循自下而上设置，提供生物物理和技术成本信息⁶³。该模型通过在技术、资源和政治约束下最大化福利（消费者和生产者盈余之和），以10年的时间跨度计算2000年至2100年的市场均衡。每个跨度中，市场价格都会进行内生调整，以平衡每种产品和地区的供需。GLOBIOM-中国的发展使其更能代表中国农业部门和环境的动态，同时进行详细验证，并根据中国现有政策做了限制性假设。⁶⁴

MAgPIE-中国

农业生产及其对环境的影响模型（MAgPIE）是全球农业经济土地系统模型^{65, 66, 67, 68}，与基于栅格的动态植被模型LPJmL相关^{69, 70}，空间分辨率为0.5°x 0.5°。MAgPIE将全世界分为12个区域，各国根据其地理经济条件分组⁷¹。该模型在1995年至2100年内，以每五年为一个时间跨度，以递归动态模型运行。农业生产在优化过程中由内生因素决定，在该优化过程中，对于给定数量的区域粮食和生物能源需求，总生产成本将最小化。区域粮食需求主要由人口和收入增长驱动。它考虑了区域经济条件，如农产品需求、技术发展和生产成本，以及潜在作物产量、土地和水资源限制的空间上明确的数据。该模型由此导出了每个栅格单元中的空间上明确的土地利用模式、产量和农业生产总成本。MAgPIE-中国已经进一步地发展，将中国现有的农业和环境相关政策纳入模型，以提高对中国AFOLU部门的代表性。⁷²

GCAM5.3

全球变化分析模型（GCAM）是综合工具，用于探索耦合人地系统动力学以及该系统对全球变化的响应^{73, 74}。GCAM作为一个全球模型，展示了能源、水、农业和土地利用、经济和气候等五个系统的行为和相互作用。其能源经济系统目前在全球32个地区运行，土地被划分为300多个子区域，233个流域的水资源被追踪。GCAM5.3的核心操作原则是市场均衡，其代表性主体利用价格信息来相互作用，并做出资源分配决策。在GCAM5.3中，农业和土地系统模块提供了有关土地利用、土地覆盖、碳储量和净排放、生物能源、粮食、纤维和森林产品生产的信息。它们的需求受到人口规模、收入水平和商品价格的影响，由此产生土地和温室气体排放量⁷⁵。对生物能源的需求由能源部门驱动，农业和土地系统模块的需求来自水系统。

vii. “递归动态”和“前瞻性动态”术语是指模型的求解方法，但它也意味着对经济主体预期预期的不同表述。在递归模型中，关于生产、消费和投资的决策基础为决策期间的价格，这通常被称为“近视”预期。因此，决策是在假设成本和价格未来保持不变的情况下做出的。在一个前瞻性的模型中，决策基于整个范围内的优化，这意味着今天关于生产和消费决策基于模型模拟中实现预期。因此，经济主体被描述为具有“完美”的预见性--自上而下的方法将整个系统视为整体，并使用简化的行为关系和计量经济学验证，而自下而上的方法从工程角度出发，在将重点扩展到整个系统之前，从感兴趣的部门的细节出发。

FABLE Calculator -中国

粮食、农业、生物多样性、土地利用和能源（FABLE）FABLE Calculator - 中国（FABLE是粮食、农业、生物多样性、土地利用和能源联盟的缩写）是用Excel编写的。它在2000-2050年的每个五年期间，在土地可用性限制下，通过确保各种用途（粮食、饲料、加工）和国内生产减去出口加进口之间的平衡来解决⁷⁶。它将农业作为土地利用变化的主要驱动力。它通过多种情景组合来测试不同政策的影响，以及上述系统驱动因素的变化，如人口增长、饮食变化、生产力增长、贸易、损失和浪费、气候变化影响等。它包括来自农作物和畜牧业的76种原加工农产品，并广泛依赖FAOSTAT（2022）数据库获取输入数据。在2000-2050年间每隔五年，模型计算农业活动水平、土地利用变化、粮食消费、贸易、温室气体排放、用水和生物多样性保护。它利用粮农组织的统计数据，校准2000年、2005年和2010年的市场平衡、农业用地和农业排放量。该模型是国家模型，因为它只代表中国的发展，并已经过修改，旨在反映中国的背景，例如中国的耕地保护红线、中国到2050年实现26%森林覆盖率的目标以及动物饲料组成的历史变化。⁷⁷

ORCHIDEE

动态生态系统中的碳和水文组织模型（ORCHIDEE）是法国皮埃尔·西蒙·拉普拉斯研究所（IPSL）的基于过程的地表模型，用于模拟陆地生态系统中碳循环以及从站点到全球尺度的水和能量通量⁷⁸。该模型可由基于观测的气候强迫、土地覆盖和土地利用变化图（植被以一系列植物功能类型表示）驱动，还能解释一系列自然和人为因素，如火灾⁷⁹、农作物⁸⁰、草原管理^{81, 82}、森林管理⁸³和生物能源作物⁸⁴。ORCHIDEE被广泛用于模拟陆地生态系统中的全球碳、水和能量通量，是用于年度全球碳预算的土地模型之一。模型中的碳、水和能量动态（存量和通量）已被广泛校准（针对其参数），并根据从站点到全球层面⁸⁵的各种陆地观测、以及从实地测量到遥感观测结果的验证，有时根据数据同化系统（ORHIDAS；<https://orchidas.lsce.ipsl.fr/>）验证。对于AFOLU部门的未来排放量，该模型可以由全球气候模型（GCMs）（如CMIP6中的模型）的气候预测和土地利用变化预测（如综合评估模型（IAMs）的作物/牧场扩展）驱动，并可以模拟不同情景下未来的全球陆地碳循环。

ORCHIDEE模型的设计旨在与全球环流模型（如IPSL-CM地球系统模型框架内的LMDz⁸⁶）耦合。它的设计使大气状态能影响地表过程，而地表反过来又通过碳、水和能量通量的变化影响大气条件。因此，陆地-大气耦合模型提供了量化地表变化的气候效应、以及气候变化对地表影响的可能性。

ORCHIDEE已针对中国陆地生态系统进行校准和验证，并用于评估碳、水和能量通量。^{87,88,89,90,91,92,93}

PECE-LIU模型

能源计划和气候经济学能源系统模型（PECE-LIU）是自下而上的国家能源-经济-环境系统模型，有丰富的技术细节，其中LULUCF模块侧重于森林碳汇估算^{94,95}。该模块基于蓄积量差值法和IPCC的林业碳汇估算框架构建，应用实地森林资源清单数据来计算国家森林碳库和其年际变化，并根据2006年至2016年的国家森林资源清查和温室气体排放清单数据进行校准。该模型采用政策驱动的方式，将近期计划（如“十四五”计划）、碳达峰和碳中和目标作为预测未来碳汇发展的重要驱动因素，定量模拟了2016年至2060年中国森林碳汇的发展潜力。其LULUCF模块与PECE-LIU的其他模块进一步整合，以协调碳源和碳汇的动态变化，支持中国的长期低碳转型路径。

AGHG-INV

农业引起的非二氧化碳温室气体排放清单模型（AGHG-INV）是有技术细节^{96,97}的自下而上模型^{viii}。它基于国家统计局数据库和2006年IPCC国家温室气体排放清单指南中公开的活动数据建立，可以在省级层面上预测农业源非二氧化碳温室气体排放⁹⁸。在AGHG-INV中，排放预测的驱动因素通过从外部输入国际上不同国家和国内认可的情景数据来计算。排放因子与基准（BAU）情景中的历史水平一致，排放量是根据主要农业活动得出的预测活动水平的函数，反映了动物饲养和作物种植随着国家人口规模、城市化、经济发展和主要食物的人均消费而变化。技术潜力（TP）情景评估了当前可用的最佳技术或实践的物理减排潜力，展示了一条常规的技术发展路径。最大技术潜力（MTP）情景评估了中国农业部门的物理减缓上限，而不考虑跨区域的任何技术、经济或社会实施障碍。

SRNM

空间参考非线性模型（SRNM）是自下而上的全球模型，它模拟了在各种环境条件和农业管理措施实践下，施用氮肥（包括合成肥料、牲畜粪便和作物残留物）后农田 N_2O 排放的变化⁹⁹。基于生物地球化学，它假设农田 N_2O 的排放因子（EF）是施用氮（N）速率的线性函数，即EF-N关系。在最近的计算中，通过使用贝叶斯递归回归树模型，假设施氮速率和EF之间存在二次关系¹⁰⁰。SRNM由许多输入数据库驱动，包括气候、土壤特性、氮输入、灌溉使用和农田历史分布等。因此它可以捕捉气候、土壤特征和作物管理实践等参数的空间异质性¹⁰¹。该模型使用来自中国153个经过同行评审的实地研究 N_2O 测量值进行校准，并通过来自中国以外180个全球分布站点的室内 N_2O 通量观测值进行独立观测验证^{102,103}。

附件二: 图4的数据和情景解释

缩略词	描述
国家清单	国家清单的官方数据, 仅适用于1994年、2000年、2005年、2010年和2014年
FABLE BAU	FABLE Calculator-中国的BAU场景。其特点是人口适度减少, 农业扩张不受限制, 植树造林目标高, 农业部门生产力增长速度中等, 动物产品消费量增加, 牲畜生产力增长低。
FABLE SUST	可持续发展之路代表人们将作出重大努力, 采取可持续的政策和做法的未来, 对应于可行行动的高边界。与当前趋势相比。
SRNM BAU	在BAU情景中, 考虑当前(2017年)的政策和国家计划, 没有任何进一步政策干预。为了养活不断增长的人口, 预计作物产量、播种面积和氮投入将增加。然而, 产量和农业管理(包括氮肥用量、肥料类型、施肥方法、耕作和灌溉方法)与2017年持平, 气候因素随部门间影响模型相互比较项目提供的未来气候情景(RCP2.6)变化。
SRNM ONR	优化氮肥用量(ONR)情景假设预测与BAU相同, 但总氮投入和氮肥用量将显著降低, 以提高农业氮肥利用效率和控制氮污染。
SRNM DIET	改变膳食指南(DIET)情景, 假设所有预测与BAU相同, 同时作物生产将转向优化人类膳食结构。DIET情景假设动物饲料玉米的相应需求将减少16%-34%, 这符合中国的饮食指南。
SRNM CFW	减少食物浪费(CFW)情景中的所有输入数据与BAU相同, 但为了实现联合国全球可持续发展目标, 假设作物产量下降, 原因是2030年、2040年和2050年与2017年相比, 粮食损失和浪费减少了50%。
SRNM ALL	所有情景是ONR、DIET和CFW的组合, 假设N投入和N速率与ONR情景相同, 同时作物产量满足情景DIET和CFW的预测。
AGHG_INV BAU	在BAU中, 农业活动的预测水平与人口规模、城市化、经济发展和人均饮食的变化有关。随着时间的推移, 中国农业部门的生产效率、EFs和技术保持不变, 不考虑进一步的发展和减缓政策或技术的推广。
AGHG_INV TP	技术潜力(TP)情景评估了当前可用的最佳技术或实践的物理减排潜力, 显示了常规的技术发展路径。
AGHG_INV MTP	最大技术潜力(MTP)情景评估了中国农业部门的物理减缓上限, 不考虑跨区域实施的任何技术、经济或社会障碍。
GLOBIOM 1200f	碳预算:1200亿吨二氧化碳, 预算方案:整个世纪的预算
GLOBIOM 200f	碳预算:200亿吨二氧化碳, 预算方案:整个世纪的预算
GLOBIOM 700f	碳预算:700亿吨二氧化碳, 预算方案:整个世纪的预算
GLOBIOM NPIREF	GLOBIOM-中国BAU场景
GCAM5.3 p25n2060	二氧化碳排放在2025年达峰, 温室气体排放在2060年达到净零
GCAM5.3 p30n2060	二氧化碳排放在2030年达峰, 温室气体排放在2060年达到净零

注:
FABLE: 粮食、农业、生物多样性、土地利用和能源
GCAM5.3: 全球变化分析模型
GLOBIOM: 全球生物圈管理模型
AGHG-INV: 农业引起的非二氧化碳温室气体排放清单模型
SRNM: 空间参考非线性模型

参考文献

1. IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O et al. (eds.)]. Cambridge University Press.
2. IPCC. (2019). *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, et al, (eds.)]. Cambridge University Press.
3. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S. and Le Quéré, C. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), pp.3269-3340.
4. IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O et al. (eds.)]. Cambridge University Press.
5. IPCC. (2019). *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, et al, (eds.)]. Cambridge University Press.
6. Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., et al. (2018). *Global Carbon Budget 2017*. *Earth System Science Data*, 10(1), 405-448.
7. Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363,789-813.
8. van Dijk, M., Morley, T., Rau, M.L. and Saghai, Y., 2021. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7), pp.494-501.
9. USEPA. (2012). *Global Anthropogenic non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030*. United States Environmental Protection Agency, EPA 430-R-12-006.
10. Lamb, A., Green, R., Bateman, I., Broadmeadow, M., Bruce, T., Burney, J., Carey, P., Chadwick, D., Crane, E., Field, R., Goulding, K., Griffiths, H., Hastings, A., Kassoar, T., Kindred, D., Phalan, B., Pickett, ., Smith, P., Wall, E., zu Ermgassen, E. K. H. J., and Balmford, A. (2016). The potential for land sparing to offset greenhouse gas emissions from agriculture. *Nature Climate Change*, 6, 488-492.
11. Frank, S., Beach, R., Havlik, P., Valin, H., Herrero, M., Mosnier, A., Hasegawa, T., Creason, J., Ragnauth S., and Obersteiner, M. (2018). Structural change as a key component for agricultural non-CO₂ mitigation efforts. *Nature Communication*, 9,1060.
12. Roe, S., Streck, C., Beach, R., Busch, J., Chapman, M., Daioglou, V., Deppermann, A., Doelman, J., Emmet-Booth, J., Engelmann, J. and Fricko, O. (2021). Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. *Global Change Biology*, 27(23), 6025-6058.
13. Chen, M. and Forsell, N. (2020) Agriculture, forestry and other land use sector. In: *China's New Growth Pathway: From the 14th Five Year Plan to carbon neutrality*. Energy Foundation, Beijing.
14. Chen, M. and Forsell, N. (2020) (ibid.).
15. Chen, M. and Forsell, N. (2020) (ibid.).
16. National Bureau of Statistics. (2022). National Data Platform. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/>
17. FAOSTAT. (2022). Food and Agriculture Data. <http://www.fao.org/faostat/en/>

18. FAO. (2022). *China at a Glance*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/china/fao-in-china/china-at-a-glance/en/>
19. Cao, K. H., and Birchenall, J. A. (2013). Agricultural productivity, structural change, and economic growth in post-reform China. *Journal of Development Economics*, 104,165-180.
20. Yu, J. L., Wu J. (2018). The sustainability of agricultural development in China: The agriculture-environment nexus. *Sustainability*, 10, 1776.
21. Zhao, H., Chang, J.F., Havlik, P., et al. (2021). China's future food demand and its implications for trade and environment. *Nature Sustainability*, 4:1042-1051.
22. National Bureau of Statistics. (2022). National Data Platform. <http://https--data--stats--gov--cn--774e4192.proxy.www.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
23. National Bureau of Statistics. (2022) (ibid.)
24. AGFEP. (2021). 2021 China and global food policy report: Rethinking agrifood systems for the post-COVID world.. Academy of Global Food Economics and Policy (AGFEP), China Agricultural University. Beijing. <http://agfep.cau.edu.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=2105141928327359.pdf>
25. AGFEP. (2021) (ibid.)
26. Chen, M. and Forsell, N. (2020) (ibid.)
27. Ni, H. X., Lyu, X. D. (2018). Understanding the gap between the competitiveness of Chinese agricultural products and those of other countries. *Agriculture Newsletter*. (10):59-61.
28. AGFEP. (2022). 2022 China and global food policy report: Reforming agricultural support policy for transforming agri-food systems. Academy of Global Food Economics and Policy (AGFEP), China Agricultural University. Beijing. <http://agfep.cau.edu.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=6dbb930c64de42458dc72edba23fbcdf.pdf>
29. AGFEP. (2022) (ibid.)
30. Zhao, H., Chang, J.F., Havlik, P., et al. (2021). China's future food demand and its implications for trade and environment. *Nature Sustainability*, 4:1042-1051.
31. FAOSTAT. (2022). Food and Agriculture Data. <http://www.fao.org/faostat/en/>
32. Government of China (2018). *The People's Republic of China Second Biennial Update Report on Climate Change*. https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/23146085_China-BUR2-1-China_BUR2_English.pdf
33. Government of China (2016). *The People's Republic of China First Biennial Update Report on Climate Change*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/chnbur1.pdf>
34. Government of China (2018). *The People's Republic of China Third National Communication on Climate Change*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/China%203NC_English_0.pdf
35. Government of China (2018). (ibid.)
36. Government of China (2018). (ibid.) (Table 2)
37. Government of China (2018). (ibid.)
38. Government of China (2018). (ibid.) (Table 4)
39. Zhou, F., Shang, Z., Ciais, P., Tao, S., Piao, S., Raymond, P., He, C., Li, B., Wang, R., Wang, X., Peng, S., Zeng, Z., Chen, H., Ying, N., Hou, X., Xu, P. (2014). A new high-resolution N₂O emission inventory for China in 2008. *Environmental Science & Technology*, 48, 8538-8547.
40. Government of China (2018). (ibid.) (Table 5)

41. Government of China (2018). (ibid.) (Table 6)
42. Government of China (2018). (ibid.)
43. Government of China (2018). (ibid.) (Table 7)
44. Government of China (2018). (ibid.) (Table 8)
45. Government of China (2012). Second National Communication on Climate Change of The People's Republic of China. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/The%20Second%20National%20Communication%20on%20Climate%20Change%20of%20P.%20R.%20China.pdf>
46. Government of China (2016). *The People's Republic of China First Biennial Update Report on Climate Change*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/chnbur1.pdf>
47. Government of China (2018). (ibid.)
48. Government of China (2012). Second National Communication on Climate Change of The People's Republic of China. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/The%20Second%20National%20Communication%20on%20Climate%20Change%20of%20P.%20R.%20China.pdf>
49. Government of China (2016). (ibid.)
50. Government of China (2016). (ibid.)
51. Grassi, G., Stehfest, E., Rogelj, J., Van Vuuren, D., Cescatti, A., House, J., Nabuurs, G.J., Rossi, S., Alkama, R., Viñas, R.A. and Calvin, K., 2021. Critical adjustment of land mitigation pathways for assessing countries' climate progress. *Nature Climate Change*, 11(5), pp.425-434.
52. Government of China (2018). (ibid.)
53. Roe, S., Streck, C., Obersteiner M., Frank, S., Griscom, B., Drouet, L., Fricko, O., Gusti, M., Harris, N., Hasegawa, T., Hausfather, Z., Havlik, P., House, J., Nabuurs, G., Popp, A., Sanchez M. J. S., Sanderman, J., Smith, P., Stehfest, E., and Lawrence, D. (2019). Contribution of the land sector to a 1.5 degree world. *Nature Climate Change*, 9, 817-828.
54. Chen, W. Y. (2015). The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: A nationwide estimate. *Cities*, 44, 112-120.
55. Song, X. P., Tan, P. Y., Edwards, P., and Richards, D. (2018). The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 162-170.
56. Jonas, M., Marland, G., Krey, V., Wagner, F. and Nahorski, Z. (2014). Uncertainty in an emissions-constrained world. *Climatic Change*, 124(3), 459-476
57. Pulles, T. (2017). Did the UNFCCC review process improve the national GHG inventory submissions? *Carbon Management*, 8(1):19-31
58. Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Bakker, D.C., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J. and Sitch, S. (2022). Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*, 14(4), pp.1917-2005
59. Government of China (2018). (ibid.)
60. McRoberts, R. E., Tomppo, E. O. and Næsset, E. (2010). Advances and emerging issues in national forest inventories. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(4), 368-381.
61. Ståhl, G., Heikkinen, J., Petersson, H., Repola, J. and Holm, S., 2014. Sample-based estimation of greenhouse gas emissions from forests—a new approach to account for both sampling and model errors. *Forest Science*, 60(1), pp.3-13.
62. McGlynn, E., Li, S., F Berger, M., Amend, M., & L Harper, K. (2022). Addressing uncertainty and bias in land use, land use change, and forestry greenhouse gas inventories. *Climatic Change*, 170(1), 1-25

63. Havlík, P., Valin, H., Gusti, M., Schmid, E., Leclere, D., Forsell, N., Herrero, M., Khabarov, N., Mosnier, A., Cantele, M., and Obersteiner, M. (2015). Climate Change Impacts and Mitigation in the Developing World, An Integrated Assessment of the Agriculture and Forestry Sectors. Background Paper for the World Bank Report: "Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty." Policy Research Working Paper WPS7477. The World Bank, Washington DC.
64. Zhao, H., Chang, J.F., Havlik, P., et al. (2021). China's future food demand and its implications for trade and environment. *Nature Sustainability*, 4:1042-1051.
65. Lotze-Campen, H., Müller, C., Bondeau, A., Rost, S., Popp, A. and Lucht, W. (2008). Global food demand, productivity growth, and the scarcity of land and water resources: a spatially explicit mathematical programming approach. *Agricultural Economics*, 39(3), pp.325-338.
66. Popp, A., Humpenöder, F., Weindl, I., Bodirsky, B.L., Bonsch, M., Lotze-Campen, H., Müller, C., Biewald, A., Rolinski, S., Stevanovic, M., Dietrich, J.P. (2014). Land-use protection for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4, 1095–1098. <https://doi.org/10.1038/nclimate2444>
67. Dietrich, J.P., Bodirsky, B.L., Humpenöder, F., Weindl, I., Stevanović, M., Karstens, K., Kreidenweis, U., Wang, X., Mishra, A., Klein, D., Ambrósio, G., Araujo, E., Yalaw, A.W., Baumstark, L., Wirth, S., Giannousakis, A., Beier, F., Chen, D.M.-C., Lotze-Campen, H., Popp, A. (2019). MAGPIE 4 – a modular open-source framework for modelling global land systems. *Geoscientific Model Development*, 12, 1299–1317. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1299-2019>
68. Wang, X., Dietrich, J.P., Lotze-Campen, H., Biewald, A., Stevanović, M., Bodirsky, B.L., Brümmer, B., Popp, A. (2020). Beyond land-use intensity: Assessing future global crop productivity growth under different socioeconomic pathways. *Technological Forecasting and Social Change* 160, 120208. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120208>
69. Bondeau, A., Smith, P., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B. (2007). Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* 13, 679–706.
70. Schaphoff, S., von Bloh, W., Ramming, A., Thonicke, K., Biemans, H., Forkel, M., Gerten, D., Heinke, J., Jagermeyr, J., Knauer, J., Langerwisch, F., Lucht, W., Muller, C., Rolinski, S., Waha, K. (2018). LPJmL4 – a dynamic global vegetation model with managed land – Part 1: Model description. *Geoscientific Model Development*, 11, 33, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1343-2018>
71. Dietrich, J.P., Bodirsky, B.L., Humpenöder, F., Weindl, I., Stevanović, M., Karstens, K., Kreidenweis, U., Wang, X., Mishra, A., Klein, D., Ambrósio, G., Araujo, E., Yalaw, A.W., Baumstark, L., Wirth, S., Giannousakis, A., Beier, F., Chen, D.M.-C., Lotze-Campen, H., Popp, A. (2019). MAGPIE 4 – a modular open-source framework for modelling global land systems. *Geoscientific Model Development*, 12, 1299–1317. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1299-2019>
72. Wang, X., Xu, M., Lin, B., Bodirsky, B. L., Xuan, J., Dietrich, J.P., Stevanović, M., Bai, Z., Shuqin, L.M., Shenggen Fan, J., Lotze-Campen, H. and Popp, A. (In revision). Reforming China's fertilizer policies: Implications for nitrogen pollution reduction and food security.
73. Edmonds, J.A., Wise, M.A. and MacCracken, C.N. (1994). *Advanced Energy Technologies and Climate Change: An analysis using the global change assessment model (GCAM) (No. PNL-9798)*. Pacific Northwest National Lab, Richland, WA (United States).
74. Calvin, K., Patel, P., Clarke, L., Asrar, G., Bond-Lamberty, B., Cui, R.Y., Vittorio, A.D., Dorheim, K., Edmonds, J., Hartin, C. and Hejazi, M. (2019). GCAM v5. 1: representing the linkages between energy, water, land, climate, and economic systems. *Geoscientific Model Development*, 12(2), pp.677-698.
75. Edmonds, J.A., Wise, M.A. and MacCracken, C.N. (1994). *Advanced Energy Technologies and Climate Change: An analysis using the global change assessment model (GCAM) (No. PNL-9798)*. Pacific Northwest National Lab, Richland, WA (United States).

76. Mosnier, A., Penescu, L., Perez Guzman, K., Steinhauser, J., Thomson, M., Douzal, C., Poncet, J. (2020). FABLE Calculator 2020 update. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and Sustainable Development Solutions Network (SDSN), Laxenburg, Austria. https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/16934/7/210108_FABLECalculator_Documentation_final_clean.pdf.
77. Jin X., Bai Z., Zhao H., Wang X., Chang J., Hua F. and Ma L. (2020), "Pathways to Sustainable Land-Use and Food Systems in China by 2050" In: FABLE 2020, Pathways to Sustainable Land Use and Food Systems, 2020 Report of the FABLE Consortium. Laxenburg and Paris: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and Sustainable Development Solutions Network (SDSN), pp. 195-229. <https://doi.org/10.22022/ESM/12-2020.1689>
78. Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I.C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19. <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>
79. Yue, C., Ciais, P., Cadule, P., Thonicke, K., Archibald, S., Poulter, B., Hao, W.M., Hantson, S., Mouillot, F., Friedlingstein, P., Maignan, F., and Viovy, N. (2014). Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE – Part 1: simulating historical global burned area and fire regimes. *Geosci. Model Dev.* 7, 2747-2767.
80. Wu, X., Vuichard, N., Ciais, P., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Wang, X., Magliulo, V., Wattenbach, M., Vitale, L., Di Tommasi, P., Moors, E.J., Jans, W., Elbers, J., Ceschia, E., Tallec, T., Bernhofer, C., Grünwald, T., Moureaux, C., Manise, T., Ligne, A., Cellier, P., Loubet, B., Larmanou, E., and Ripoche, D. (2016). ORCHIDEE-CROP (v0), a new process-based agro-land surface model: model description and evaluation over Europe. *Geosci. Model Dev.* 9, 857-873.
81. Chang, J., Ciais, P., Gasser, T., Smith, P., Herrero, M., Havlík, P., Obersteiner, M., Guenet, B., Goll, D.S., Li, W., Naipal, V., Peng, S., Qiu, C., Tian, H., Viovy, N., Yue, C., Zhu, D. (2021). Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nature Communications* 12, 118.
82. Chang, J.F., Viovy, N., Vuichard, N., Ciais, P., Wang, T., Cozic, A., Lardy, R., Graux, A.I., Klumpp, K., Martin, R., Soussana, J.F. (2013). Incorporating grassland management in ORCHIDEE: model description and evaluation at 11 eddy-covariance sites in Europe. *Geoscientific Model Development*, 6, 2165-2181.
83. Naudts, K., Ryder, J., McGrath, M.J., Otto, J., Chen, Y., Valade, A., Bellasen, V., Berhongaray, G., Bönisch, G., Campioli, M. and Ghattas, J. (2015). A vertically discretised canopy description for ORCHIDEE (SVN r2290) and the modifications to the energy, water and carbon fluxes. *Geoscientific Model Development*, 8(7), pp.2035-2065.
84. Li, W., Yue, C., Ciais, P., Chang, J., Goll, D., Zhu, D., Peng, S., Jornet-Puig, A. (2018). ORCHIDEE-MICT-BIOENERGY: an attempt to represent the production of lignocellulosic crops for bioenergy in a global vegetation model. *Geoscientific Model Development*, 11, 2249-2272.
85. Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, I.C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19. <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>.
86. Remaud, M., Chevallier, F., Cozic, A., Lin, X. and Bousquet, P. (2018). On the impact of recent developments of the LMDz atmospheric general circulation model on the simulation of CO₂ transport. *Geoscientific Model Development*, 11(11), pp.4489-4513.
87. Tan, K., Ciais, P., Piao, S., Wu, X., Tang, Y., Vuichard, N., Liang, S. and Fang, J. (2010). Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(1).
88. Piao, S., Yin, G., Tan, J., Cheng, L., Huang, M., Li, Y., Liu, R., Mao, J., Myneni, R.B., Peng, S. and Poulter, B. (2015). Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 21(4), 1601-1609.

89. Piao, S., Fang, J., Ciais, P., Peylin, P., Huang, Y., Sitch, S., Wang, T. (2009). The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 458, 1009-1013
90. Wang, T., Ottle, C., Boone, A., Ciais, P., Brun, E., Morin, S., Krinner, G., Piao, S. and Peng, S. (2013). Evaluation of an improved intermediate complexity snow scheme in the ORCHIDEE land surface model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12), 6064-6079.
91. Wang, X., Ciais, P., Li, L., Ruget, F., Vuichard, N., Viovy, N., Zhou, F., Chang, J., Wu, X., Zhao, H. and Piao, S. (2017). Management outweighs climate change on affecting length of rice growing period for early rice and single rice in China during 1991–2012. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 1-11.
92. Wang, Z., Chang, J., Peng, S., Piao, S., Ciais, P. and Betts, R. (2019). Changes in productivity and carbon storage of grasslands in China under future global warming scenarios of 1.5° C and 2° C. *Journal of Plant Ecology*, 12(5), pp.804-814
93. Yin, Z., Wang, X.H., Ottlé, C., Zhou, F., Guimberteau, M., Polcher, J., Peng, S.S., Piao, S.L., Li, L., Bo, Y. and Chen, X.L. (2020). Improvement of the irrigation scheme in the ORCHIDEE land surface model and impacts of irrigation on regional water budgets over China. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*, 12(4), p.e2019MS001770.
94. Energy Foundation China. (2020). *Synthesis Report 2020 on China's Carbon Neutrality: China's New Growth Pathway: from the 14th Five Year Plan to Carbon Neutrality*. Energy Foundation China, Beijing.
95. Liu, J., Yin, M., Xia-Hou, Q., Wang, K., Zou J. (2021). Comparison of sectoral low-carbon transition pathways in China under the nationally determined contribution and 2° C targets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 149: 111336
96. Energy Foundation China. (2020). *Synthesis Report 2020 on China's Carbon Neutrality: China's New Growth Pathway: from the 14th Five Year Plan to Carbon Neutrality*. Energy Foundation China, Beijing.
97. Chen, M., Cui, Y., Jiang, S., Forsell, N. (2022). Toward carbon neutrality before 2060: trajectory and technical mitigation potential of non-CO₂ greenhouse gas emissions from Chinese agriculture. *Journal of Cleaner Production*. 133186.
98. IPCC. (2008). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – A primer*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Miwa K., Srivastava N. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan.
99. Wang, Q., Zhou, F., Shang, Z., et al. (2020). Data-driven estimates of global nitrous oxide emissions from croplands. *National Science Review*, 7(2), 441-452.
100. Zhou, F., Shang, Z., Zeng, Z., et al. (2015). New model for capturing the variations of fertilizer-induced emission factors of N₂O. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(6), 885-897
101. Shang, Z., Zhou, F., Smith, P., Saikawa, E., Ciais, P., Chang, J., Tian, H., del Grosso, S. J., Ito, A., Chen, M., Wang, Q., Bo, Y., Cui, X., Castaldi, S., Juszczak, R., Kasimir, A., Magliulo, V., Medinets, S., Medinets, V., Rees, R. M., Wohlfahrt, G., Sabbatini, S. (2019). Weakened growth of cropland-N₂O emissions in China associated with nationwide policy interventions. *Global Change Biology*, 25(11), 3706-3719.
102. Cui, X., Zhou, F., Ciais, P., et al. (2021). Global mapping of crop-specific emission factors highlights hotspots of nitrous oxide mitigation. *Nature Food*, 2(11), 886-893.
103. Cui, X., Shang, Z., Xia, L., et al. (2022). Deceleration of cropland- N₂O emissions in China and future mitigation potentials. *Environmental Science & Technology*, 56(7), 4665-4675.

模拟中国农业、林业和其他 土地利用部门(AFOLU)的 温室气体通量：

差距与建议

2023年5月