

## 附录

### （附录 1-4 属于第二章；附录 5-7 属于第三章）

#### 附录 1 中国农业产业模型方法介绍与主要农产品碳排放系数

本章采用中国农业科学院农业经济与发展研究所与国际食物政策研究所（IFPRI）共同开发的中国农业产业模型（China Agriculture Sector Model, CASM）预测未来农产品供需趋势和模拟各种减排情景。基于该模型，中国农业科学院农业经济与发展研究所、中国农业大学和浙江大学形成中国农业食物系统模型联盟，修正参数、增加碳排放系数和膳食营养指标等，用于进一步模拟政策变化或外界冲击对农业温室气体排放和居民膳食营养摄入量等的影响。CASM 模型是涵盖 31 种农产品和农产品加工的中国农产品局部均衡模型，其中包括 6 种粮食品种，以及棉花、油菜籽和花生、甘蔗和甜菜、蔬菜和水果，10 种畜产品、以及 7 种农产品加工品（豆粕、豆油、菜粕、菜籽油、花生粕、花生油、食糖）。

中国农业产业模型（CASM）的基础数据是各种农产品的供需平衡表，其中生产数据与进出口数据来源于国家统计局，各种农产品价格数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》、《中国统计年鉴》和农业农村部发布的《中国农产品供需形势分析》等。模型参数包括各种农产品的供给价格弹性、需求价格弹性和需求收入弹性等，主要来自于参考文献和研究团队的估计值。该模型应用 GAMS（通用代数建模系统）软件进行开发和模型求解。目前，该模型由 36 组方程组成，共 566 个单方程，23 组变量和 566 个内生变量以及若干外生变量构成。

在计算农业温室排放时，畜产品碳排放系数来源于联合国粮农组织数据库（FAOSTAT），计算每单位产品产量的碳排放系数。农作物碳排放通常来源于作物残留物排放、焚烧秸秆排放、使用化肥排放、稻田耕地排放。农作物碳排放系数通过参考 FAO 的计算方法，结合《全国农产品成本收益调查统计资料汇编》中关于各种农作物单位面积化肥使用量和《中国统计年鉴》中各种作物的面积，估计各种作物的化肥碳排放结构比例，依据 FAO 提供的化肥排放数量，估计单位农作物面积的化肥碳排放系数，见表 2。

表 2. 中国农产品温室气体排放系数

农作物	化肥排放系数	焚烧秸秆排放系数	作物残留物排放系数	稻田排放系数	畜产品	畜产品排放系数
二氧化碳当量/公顷					二氧化碳当量(吨)/产量(吨)	
水稻	1.0	0.0	0.4	3.7	猪肉	0.9
小麦	1.2	0.0	0.4		牛肉	15.8
玉米	1.1	0.1	0.3		羊肉	12.9
其他粮食	.00	0.0	0.0		禽肉	0.5
大豆	0.0	0.0	0.1		禽蛋	0.6
油菜籽	0.4	0.0	0.1		奶产品	1.2

花生	0.7	0.0	0.0
棉花	0.9	0.0	0.0
甘蔗	1.6	0.0	0.0
甜菜	2.5	0.1	0.0
水果	1.9	0.0	0.0
蔬菜	1.9	0.0	0.0

数据来源：FAO 和作者计算

以 2020 年作为基准年，通过递归动态预测到 2060 年。在基准情景中，对未来社会经济发展进行了一系列假设，包括人口、经济发展、居民收入、科技进步等因素。未来食物消费需求主要取决于经济发展水平、人口变化、城镇化率等因素。依据中国城乡人口统计数据 and 联合国人口增长方案，中国人口总量将在 2031 年达到高峰，为 14.3 亿，之后开始下降，到 2060 年，人口总量减少到 13 亿，城镇化率从 2020 年的 61.6% 提高到 2060 年的 83.3%。依据十九大报告对中国中长期发展做出远景规划，2035 年基本实现社会主义现代化，2050 年要建成社会主义现代化强国，在模型中，2020-2060 年期间，假设 GDP 增长率呈递减趋势，从“十四五”期间的 5.6% 下降为 2055-2060 年的 2.5%。城乡居民的人均食物消费量将趋同，对肉类、奶和水果等的消费量仍将保持小幅增长，但粮食需求量呈下降趋势。

## 附录 2 农业食物系统减排研究现状

国内外学者围绕农业食物系统的减排方案开展研究，认为农业食物系统减排措施包括技术进步、减少食物浪费和损失、改变居民膳食结构、其他减排方式及实施各种综合情景等。

### (1) 农业技术变化的减排效果研究

农业技术进步主要包括作物技术进步和畜牧业技术进步两类。关于农作物技术进步减排的研究主要集中在水稻、小麦和玉米的主粮作物。在水稻减排技术方面，水稻强化技术 (SRI) 是一种利用农业-生态系统的方法来提高水稻生产力的技术，被广泛研究。例如康奈尔大学的研究表明，SRI 能使得单产增加 20-50%，化肥和其他农业化学投入品减少 30-50%，甲烷排放量减少 22%-64%，温室气体排放总量减少 20-30%。Gathorne-Hardy 等研究表明，SRI 技术可使温室气体排放减少 40% (Gathorne-Hardy et al., 2016)。Lin et al. (2009) 认为 SRI 能使中国水稻产量增加 15%。Zheng et al. (2013) 则认为 SRI 技术能使单产增加 55%，同时用水量减少约 25%。Wu et al. (2015) 利用 Meta 分析发现，SRI 技术能使得水稻产量增加 10.9%，同时减少 35% 的灌溉用水。此外，Peng 和张福锁等认为，利用 Site-specific N Management (SSNM) 技术可使水稻产量提高 5%，并减少 32% 的氮肥施用量 (Peng et al., 2010)。有学者认为水稻施用缓释肥技术使得氮肥回收率提高 9.84% (刘汝亮等, 2018) 和氮素投入降低 40% (张爱平等, 2012)。

在玉米技术变化方面，增加玉米种植密度、缓释肥技术、秸秆深翻还田技术以及 root zone/rhizosphere management 是主要增产的技术，分别使玉米产量增加 6.6%-20.2%、3.2%、5.5%、10.3%，并认为缓释肥技术能提高氮肥利用率 22.2%，减少施氮量 11.1% (Xu et al., 2017; 蔡红光等, 2016; Jiao et al., 2016; Liu et al., 2021; Li et al., 2021)。在小麦技术变化方面，研究者认为 root zone/rhizosphere management、精准的氮肥投入、ecologically (EOR)

and socially (SOR) optimized N rates 能分别增加小麦产量 10.2%、1-19%、10-12%，并认为 EOR 和 SOR 能减少氮损失 54-63%。此外，有学者认为有些技术能对三大主粮作物均产生影响。如 Integrated Soil–Crop System Management (ISSM)技术能使玉米、水稻和小麦的单产平均提高 10.8-11.5%、18-35%，同时能减少施氮量 14.7%-18.1%，并使得温室气体排放量分别下降 22%、14%和 21%（张福锁等，2018；CHEN et al., 2014；Cui et al., 2018）。

在畜牧业技术减排方面，大量研究认为可通过提高牲畜生产力、使用适合的饲料和将粪便转化为堆肥来改善粪便管理和肠道发酵的碳排放（Frank et al., 2019, Lin et al., 2019）。根据 Frank 和 Lin 等的估计，到 2050 年，中国农业部门的温室气体减缓潜力为 3.3-7.5 亿吨二氧化碳当量/年，包括动物饲料添加剂、硝化抑制剂或厌氧消化器等的技术应用可减少碳排放量的 30-94%。Nayak 等（2015）采用荟萃分析法（meta-analysis）分析中国农业缓解措施的技术潜力时认为，对于畜牧业生产来说，改善放牧管理和饲料质量可平均减少 11%和 5%的甲烷（CH<sub>4</sub>）排放。此外，有学者认为通过提高饲料转化率可减少畜牧业对饲料的需求，进而减少碳排放。如 Bai et al.（2014）在分析中国生猪生产的变化及其对氮、磷利用和损失的影响时，认为到 2030 年生猪的饲料转化率可提高 20%，达到欧盟的现有水平，并发现在该情境下氮损失将下降 25%。Soleimani and Gilbert（2021）认为在一般的生产系统水平下，与传统饮食结构相比，优化定制饮食的环境评分（the environmental score of the optimised tailored diets）能使得生猪的饲料转化率提高至少 3.8%。Besson et al.（2016）认为通过基因改善技术带来渔产品饲料转化率提高 7.6%，导致气候变化减少 6%。此外，一项报道称基因改善能使得生猪的饲料转化率从 3.8:1 提高到 3.1:1<sup>1</sup>。

表 3. 农业技术实施效果的文献梳理

作者	技术名称	产品	效果	节肥	减排
Zheng J 等	水稻强化栽培技术（SRI）、三角型种植方法	水稻	提升 55%产量		
Gathorne-Hardy A 等	SRI	水稻	产量增长 58%		甲烷排放减少（无具体数据）
Gathorne-Hardy A 等	SRI	水稻			温室气体排放减少 40%
Wu et al.	SRI	水稻	产量增长 10.9%(7.6-14.1%)	减少 35%的灌溉用水	
Lin et al.	SRI	水稻	产量增加 15%		
Peng S, 张福锁等	Site-specific N Management (SSNM)	水稻	产量提高 5%	平均减少 32%氮肥用量	

<sup>1</sup> <https://www.farmersweekly.co.za/animals/pigs/the-future-of-pig-genetics/>

张福锁等	Integrated soil-crop system management (ISSM)	玉米、水稻、小麦	平均单产增加 10.8%-11.5%	施氮量减少 14.7%-18.1%	使玉米、水稻和小麦温室气体排放量分别下降 22%、14% 和 21%
CHEN et al.	ISSM		单产分别提高 18%、24%、35%		
Cui et al.	ISSM	水稻、小麦、玉米	单产提高 10.8-11.5%	化肥施用量下降 14.7-18.1%	温室气体的排放量下降 14%-22%
刘汝亮等	施用缓/控释肥料	水稻		氮肥回收率提高 9.84%，氮肥农学利用率增加了 10.83kg/kg	
张爱平等	侧条施肥技术条件下不同缓释肥用量	水稻		氮素投入降低 40%	
张爱平等	生物炭和氮肥配施	水稻	增产率最高达 44.89%		
Xu et al. (2017)	增加玉米种植密度	玉米	提高 6.6% 玉米产量	提高氮肥利用率 3.9%	
Liu et al.(2021)	增加玉米种植密度	玉米	产量增加 10.9-20.2%		
Li et al.(2021)	缓释肥技术	玉米	产量增加 3.2%	氮肥利用率提高 22.2%；减少施氮量 11.1%	
蔡红光等（2016）	秸秆深翻还田	玉米	提高单产 5.5%		
Jiao et al. (2016)	Root zone/rhizosphere management	玉米、小麦	产量分别提高 10.3%、10.2%		
Liu et al.（2016）	精准的氮肥投入	小麦	产量增加 1-19%		
Ying et al. (2017)	ecologically (EOR) and socially (SOR) optimized N rates	小麦	增加小麦产量 10-12%	减少氮损失 54-63%	
Ishfaq et al.(2020)	Alternate wetting and drying	水稻	单产保持不变情况下		减少用水 25-70%，减少甲烷排 11-95%
Setyanto et al. (2018)	Alternate wetting and drying	水稻	单产保持不变情况下		减少甲烷排放 35%
QaisarSaddique et al.（）		小麦	2030s,2060s, 2090s 分别增长 6.75%，21.5% 和 26.5%		
Wang et al.	适度施用有机肥	小麦	单产提高 18%—28%		

Zheng et al.		小麦	单产提高 14%—26%		
Xiao et al.		玉米	单产到 2040s 和 2080s 分别 提高 12-- 27%		
Zhao et al.		玉米	单产提高 28%		
Ren et al.		玉米	单产提高 35%		温室气体 排放减少 49%
Frank et al.; Lin et al.	动物饲料添加剂、硝化抑制剂或厌氧消化器等	畜牧业			温室气体 排放减少 30-94%
Nayak et al.	改善放牧管理和饲料质量	畜牧业			减少 11% 和 5% 的甲 烷排放
Bai et al. (2014)	提高饲料转化率	生猪	到 2030 年 中国生猪的 饲料转化率 可提高 20%，达到 欧盟的现有 水平		在该情境 下氮损失 将下降 25%
Besson et al. (2016)	通过基因改善提高饲料转化率	渔产品	饲料转化率 提高 7.6%		减少 6% 的 气候变化

资料来源：作者整理

## (2) 食物损失和浪费变化的减排效果研究

在食物损失和浪费现状方面，不同学者对不同产品的全产业链各个环节的损失比例进行了研究。在主粮产品方面（表 4），稻谷的全产业链损耗（包括消费端损失在内）的比例大约在 13.64%（卢士军等，2019）、19.0%±5.8%（Liu J et al., 2013），而有学者认为在不包括消费端损失的情况下稻谷的全产业链损失应在 17.9-28.4%（Liu G et al., 2014）。蔬菜和水果的全产业链损耗比例较高，在不考虑消费端损失的情况下两者的损耗比例均处于 45-55%（Liu G et al., 2014）。

表 4. 主要作物产品全产业链损耗比例

作者	作物	不同环节						合计
		收获	收获后处理	存储	加工	流通	消费	
卢士军 (2019)	稻谷	2.84%	1.85%	1.21%	1.73%	0.79%	5.22%	13.64%
Liu J et al. (2013)	稻谷	3.5% ±2.6%		5.5% ± 3.4%	3.1% ± 1.1%	1.2% ± 1.2%	7.3% ± 4.8%	19.0% ± 5.8%
Liu G et al. (2014)	稻谷	5-9%	4-6%	5.7-8.6%	2.2-3.3%	1-1.5%		17.9-28.4%
黄东等 (2018)	水稻	3.02%						

宋洪远等 (2015)	小麦	1.60%	0.10%	0.30%		0.07%		2.10%
曹芳芳等 (2018)	小麦	4.72%						
罗屹等 (2020)	玉米	2.74%						
高利伟 (2019)	水稻	√	√	√		√		6.90%
	小麦	√	√	√		√		7.80%
	玉米	√	√	√		√		9.00%
Liu G et al.(2014)	蔬菜	20-30%		15%		10%		45-55%
	水果	20-30%		15%		10%		45-55%

资料来源：作者整理

注：√是指包括该环节但无具体数字

在肉类产品方面（表 5），在不包括消费端损失浪费情况下，全产业链损耗比例为 13-19.9%（Liu G et al., 2014），其中猪肉的损耗比例 8.10%、鸡肉的损耗比例为 7.43-12.85%、牛肉的损耗比例为 11.47%、羊肉的损耗比例为 7.45%（周琳等，2019）。除消费端损失之外，渔产品的全产业链损耗比例为 9.2%。

表 5. 主要肉类产品全产业链损耗比例

作者	产品	不同环节								合计
		预冷排酸	分割	收获	处理	存储	加工	运输	零售	
周琳等 (2019)	猪肉	1.44%	0.99%			3.98%		0.24%	1.46%	8.10%
	白羽鸡	2%	1.25%			5.80%		0.63%	3.17%	12.85%
	黄羽鸡	2%	0%			2.84%		0.58%	2%	7.43%
	牛肉	1.51%	3.18%			2.79%		0.86%	3.13%	11.47%
	羊肉	1.07%	1.36%			0.92%		0.83%	3.27%	7.45%
Liu G et al.(2014)	肉类			5-10%	1.4-2.1%	2.5-3.7%	1.1%	3%		13-19.9%
	渔产品				2%	4%		3.20%		9.20%

资料来源：作者整理

在食物在外消费的浪费方面（表 6），蔬菜的浪费比例最高，达到 29%（Wang et al., 2017），其次是主食，浪费比例在 28.7%，肉类的浪费比例在 15.93%，水产品的浪费比例为 8.57-11%，水果和奶制品的浪费比例相对较低（曹晓昌等，2020）。

表 6. 在外消费的浪费比例

作者	蔬菜	肉类	大米	水产品	小麦	猪肉	水果	奶制品	主食
Wang et al. (2017)	29%		14%	11%	10%	8.0%	1.1%	0.8%	
曹晓昌等 (2020)		15.93%		8.57%					28.70%

资料来源：作者整理

在减少食物损失和浪费的现状基础上，学者通过设定不同方案分析其减排的潜力。例如 Munesue et al. (2015) 利用 PEATSim 模型分析食物损失和浪费的环境影响时，将食物损失和浪费方案设定为下降 50%，发现该方案能使得全球温室气体排放减少 1.6%，中国减少 0.7%。Springmann et al. (2018) 利用全球食物系统模型分析环境约束下食物系统的发展路径时，在考虑联合国可持续发展目标和最大理论损失减少阈值的情况下，将食物损失模拟方案分别设定为到 2050 年下降 50% 和 75%，并发现与基期相比，这两种方案分别会减少温室气体排放 6-16% 和 9-24%。此外，Ma et al. (2019) 利用食物链模型 (Nutrient flows in Food chains, Environment and Resource use, NUFER) 分析中国未来食物供给情况时，将食物损失目标设定为到 2030 年下降 20%，认为该方案能减少 17% 的温室气体排放。

表 7. 食物损失和浪费变化对减排的影响研究

作者	方案	减排效果
Munesue et al. (2015)	食物损失和浪费方案设定为下降 50%	全球温室气体排放减少 1.6%，中国减少 0.7%
Springmann et al. (2018)	食物损失模拟方案设定为到 2050 年分别下降 50% 和 75% 两种	两种方案分别会减少温室气体排放 6-16%、9-24%
Ma et al. (2019)	食物损失目标设定为到 2030 年下降 20%	减少 17% 的温室气体排放

资料来源：作者整理

### (3) 改变饮食结构的减排效果研究

在改变居民膳食结构方面，Springmann et al. (2018) 在分析环境约束下食物系统发展时，将饮食结构方案设定为全球膳食指南和多植物性蛋白素食饮食结构两种方案，并认为两种方案分别减少 29%、56% 的温室气体排放，主要是因为两种饮食结构均改变了居民的肉类消费水平，而肉类生产是农业领域主要的碳排放来源。

### (4) 其他减排方式研究

除了上述减排方案之外，还有学者认为基于自然的解决方案也是实现减排的路径。如张小全等 (2020) 基于自然的解决方案 (NbS)，认为中国减缓潜力最大的 10 个路径依次为造林再造林、农田养分管理、混农 (牧) 林、避免薪材采伐、改进稻田管理、避免泥炭地转化、泥炭地恢复、天然林管理、最适放牧强度、种植豆科牧草。

此外，有学者关注不同方案的综合减排影响。例如，Springmann et al. (2018) 分析食物损失和浪费、农业技术进步和饮食结构变化的综合方案的影响时发现，与 2050 年的基期相比，中等方案能降低环境压力的 25-45%，而高方案能降低环境压力的 30%-60%。

### 附录3 农业生产活动碳减排的模拟方案设计

本章设计的模拟方案包括农作物的技术提高方案（TechCR）、畜牧业的技术提高方案（TechLV）、食物损失和浪费率减少方案（Waste）、膳食结构调整方案（Diets），以及综合考虑这些因素的综合方案（Comb），具体的说明如下：

第一，农作物技术提高方案（TechCR）：主要聚焦水稻、小麦和玉米三种主粮的单产水平和化肥利用率的提高。2020年，我国水稻、小麦和玉米的单产水平分别为7、5.7和6.3吨/公顷。现有科学研究关于水稻、小麦和玉米的单产提高措施包括利用生物技术、强化栽培管理、增加种植密度、适度增加有机肥使用、精准灌溉等方式，水稻的单产增长潜力在5%-18%（Chen et al., 2014; Wu et al., 2019; Lin et al., 2019），小麦的单产增长潜力为15%-28%（Chen et al., 2014; Qaisar et al., 2020; Wang et al., 2020; Zheng et al., 2020），玉米的单产增长潜力为12—35%（Chen et al., 2014; Xiao et al., 2020; Zhao et al., 2020; Ren et al., 2020）。依照现有文献研究结果，中方案设计为到2060年，水稻、小麦和玉米的单产分别增长15%、25%和35%，分别达到8.1、7.1和8.5吨/公顷。考虑到未来可能发生的技术进步和技术边际贡献递减，在中方案的基础上，单产增长水平上下浮动30%，分别设计高方案和低方案，高方案设计为到2060年，水稻、小麦和玉米的单产分别增长20%、35%和45%，分别达到8.4、7.7和9.1吨/公顷；低方案设计为到2060年，水稻、小麦和玉米的单产分别增长10%、15%和25%，分别达到7.7、6.6和7.9吨/公顷。除农作物单产提高之外，未来化肥利用效率也将呈现增加趋势，稻田排放系数呈下降趋势，在高、中和低方案中，化肥利用效率分别提高50%、40%和30%，稻田碳排放系数也分别下降50%、40%和30%。

第二，畜牧业技术提高方案（TechLV）：农业部门最具成本效益的减排潜力与畜禽养殖技术有关，包括提高畜牧业生产力、精准饲喂、养殖结构优化、反刍动物肠道发酵优化和畜禽粪便全链条管理等措施（Lin et al., 2019）。Nayak等采用荟萃分析法（meta-analysis）研究表明，改善放牧管理、饲料质量和添加膳食补充剂可减少甲烷排放约30%。Bai et al.（2014）认为到2030年生猪的饲料转化率可下降20%。综合考虑各类研究和将来各种技术的可能性，假设到2060年，畜产品碳排放系数下降和饲料转化率提高，在高、中和低方案下，畜产品碳排放系数分别下降50%、40%和30%，饲料转化率分别提高30%、20%和10%。

第三，减少食物损耗和浪费方案（Waste）：本章中的食物损耗和浪费包括全产业链的收获、运输、存储、销售、加工和居民消费各个环节的损失和浪费，其中居民消费包括在家消费和在外消费。综合食物各个环节的损失和浪费的研究，稻谷全产业链损耗的比例大约在13%~28%（卢士军等，2019；Liu J et al., 2013; Liu G et al., 2014），蔬菜和水果的全产业链损耗比例较高，高达45-55%（Liu G et al., 2014）。肉类和鱼类全产业链损耗比例分别为13-19.9%、9.2%（Liu G et al., 2014），猪肉为8.10%、鸡肉为7.43-12.85%、牛肉为11.47%、羊肉为7.45%（周琳等，2019）。在外食物消费浪费比例比较大，其中，蔬菜的浪费比例最高，达到29%（Wang et al., 2017），主食为28.7%，肉类为15.93%，水产品为8.57-11%，水果和奶制品的浪费比例较低（曹晓昌等，2020）。综合这些研究结果，在基准方案中，水稻、小麦和玉米的损耗率均为15%，蔬菜和水果损耗率分别为50%和25%，猪肉、牛肉和羊肉的损耗率为10%、15%和10%。在高、中、低方案中，假设到2060年，食物损耗和浪



费的比例分别比 2020 年下降 67%、50%和 33%。

第四，调整膳食结构方案（Diets）：如果不改变膳食结构，城镇和农村居民的畜禽肉消费量将分别从 2020 年的 148 克/日和 127 克/日增加到 2060 年的 225 克/日和 213 克/日，介于美国和欧盟目前的人均畜禽肉消费水平，2020 年分别为 278 克/日和 191 克/日，但远高于中国膳食指南推荐摄入量的标准 40-75 克/日的水平。这不仅带来肥胖等健康问题，还带来环境问题。因此，高、中和低方案将城镇和农村居民人均畜禽肉消费量调减至中国膳食指南推荐的下限、中间和上限水平，分别为 40 克/日、60 克/日和 75 克/日。

综合方案将模拟综合上述四种方案的减排效果。

表 8. 基准情景基本参数设定

	2020	2030	2060
人口（亿）	14.05	14.30	13.03
城镇化率（%）	61.6	70.8	83.3
GDP（万亿元人民币）	101.5	171.5	448

数据来源：作者整理

#### 附录 4 中国农业食物系统能源消费碳减排的模拟方案设计

表 9. 中国农业食物系统能源消费减排情景模拟设计

	2020	2060			
		基准情景	低方案	中方案	高方案
万元 GDP 能耗年均降幅（%）		1	1.2	1.5	2
万元 GDP 能耗累计下降（%）		33	38	45	57
农业（吨标准煤/万元，2005 年价格）	0.23	0.15	0.14	0.13	0.1
食品加工（吨标准煤/万元，2005 年价格）	0.35	0.23	0.22	0.19	0.15
投入品（吨标准煤/万元，2005 年价格）	0.81	0.47	0.44	0.39	0.31
交通运输、批发零售（吨标准煤/万元，2005 年价格）	2.18	1.46	1.34	1.19	0.93
餐饮（吨标准煤/万元，2005 年价格）	0.3	0.2	0.19	0.17	0.13
能源结构调整：非化石能源年均增幅（%）		0.5	0.6	0.8	1
非化石能源（新增比例%）		20	24	32	40
煤炭	33	23	21	17	13
农业能源结构（%）					
石油	41.8	31.8	29.8	25.8	21.8
天然气	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
电力和非化石能源*	25	45	49	57	65
食品加工工业能源结构（%）					
煤炭	61.2	41.2	37.2	29.2	21.2
石油	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5
天然气	9	9	9	9	9
电力和非化石能源*	27.2	47.2	51.2	59.2	67.3
投入品能源结构（%）					
煤炭	56	36	32	24	16
石油	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8
天然气	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
电力和非化石能源*	14.6	34.6	38.6	46.6	54.6
交通运					
煤炭	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

输、批发 零售能源 结构 (%)	石油	84.8	64.8	60.8	52.8	44.8
	天然气	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4
	电力和非化石能源*	6.1	26.1	30.1	38.1	46.1
餐饮能源 结构 (%)	煤炭	34.5	14.5	10.5	2.5	2.5
	石油	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
	天然气	9	9	9	9	1
	电力和非化石能源*	45.6	65.6	69.6	77.6	85.6

注：\*电力能源消费中无法分解出一次电力，这里的数据为电力比例加上非化石能源新增比例。

## 附录 5 中国城乡居民食物消费量数据来源及计算过程

目前，最新的中国人均食物消费情况数据主要来自于国家统计局，但该数据仅包含了城乡居民在家消费量，未纳入外出就餐以及其他来源的食物消费，从而导致消费数据明显偏低（辛良杰等，2015）。为了解决这个差距，本章使用中国健康与营养调查（China Health and Nutrition Survey, CHNS）的数据计算出 1997-2011 年城乡居民各类食物在外消费比例。CHNS 采用 3 天 24 小时回顾法记录了调查者的所有食物消费，这种数据搜集方式不仅能够最大程度提高食物消费数据的准确性，而且个人层面食物消费数据既包括在家就餐，也包括在外就餐，弥补了传统的食物消费数据仅包括在家消费数据而不包括在外就餐数据的漏洞。然而 CHNS 的最新可用数据仅到 2011 年，需结合郑志浩（2012）、黄季琨（2019）等研究得出的各类食物在外消费收入弹性，估计 2012-2019 年中国城乡居民各类食物的在外消费比例。因此，为了更准确地反映中国居民膳食状况，本章以国家统计局公布的在家消费数据为基础，通过各类食物在外消费比例进行调整，最终得出居民人均食物消费量。计算公式为：

$$C_{i,f} = h_f / (1 - r_{out})$$

式中， $C_{i,f}$  代表 i 年食物 f 的人均消费量， $r_{out}$  代表居民对食物 f 的在外消费比例， $h_f$  代表居民对食物 f 的在家消费量。

表 1 1997-2011 年中国城乡居民各类食物在外消费比例

食物类 别	城镇 (%)			农村 (%)		
	1997	2006	2011	1997	2006	2011
谷物	11.2	15.7	15.9	5.3	5.3	8.5
薯类	4.9	14.2	17.1	1.7	3.5	8.0
豆类	9.0	19.3	22.3	6.3	9.3	18.1
水果	4.7	4.8	7.4	2.9	4.5	4.3
蔬菜	7.1	8.9	12.7	4.0	3.6	7.2
奶类	10.8	14.6	12.7	6.4	14.0	18.0
猪肉	17.6	14.2	17.1	14.3	8.3	13.0
牛肉	17.6	25.4	25.3	14.3	13.5	22.9
羊肉	17.6	48.1	25.8	14.3	31.6	26.6

禽肉	17.6	12.4	20.6	14.3	13.0	16.6
蛋类	7.5	12.9	13.2	4.6	5.8	8.5
水产品	12.0	12.6	17.8	7.6	9.4	15.4
坚果类	18.2	18.8	6.1	15.2	5.4	10.3

数据来源：CHNS 计算得出。

表 2 2012-2019 年中国城乡居民各类食物在外消费比例

食物类别	城镇 (%)			农村 (%)		
	2012	2016	2019	2012	2016	2019
谷物	17.2	21.7	25.9	9.3	12.9	15.9
薯类	18.5	23.3	27.9	8.7	12.1	14.9
豆类	24.2	30.4	36.4	19.7	27.5	33.8
水果	8.4	11.6	14.7	4.8	7.7	10.0
蔬菜	13.8	17.5	21.0	7.9	11.1	13.7
奶类	13.5	16.4	19.1	19.3	25.4	30.5
猪肉	18.8	24.2	29.4	14.3	20.7	25.9
牛肉	27.7	35.8	43.5	25.3	36.4	45.6
羊肉	28.3	36.5	44.4	29.3	42.3	53.0
禽肉	22.6	29.1	35.4	18.3	26.4	33.1
蛋类	14.2	17.1	20.0	9.1	12.0	14.4
水产品	19.7	26.1	32.3	17.2	25.7	32.7
坚果类	6.6	8.3	9.9	11.2	15.6	19.2

数据来源：在 2011 年在外消费比例的基础上，结合 2012-2019 年人均收入变化和各类食物在外消费收入弹性计算得出。

表 3 各类食物在外消费收入弹性

	粮食	水果	蔬菜	奶类	肉类	蛋类	水产品
黄季焜等	0.24	1.01	0.42	0.54	0.54	0.54	0.76
郑志浩等	1.1	1.07	0.96	—	0.99	1.18	0.97

数据来源：黄季焜，解伟.中国农产品供需与食品安全的政策研究[M].北京：科学出版社，2019.

郑志浩，赵殷钊.收入分布变化对中国城镇居民家庭在外食物消费的影响[J].中国农村经济，2012（7）：40-50.

## 附录6 模拟方案设计

基准方案：以2020年为基准年，通过递归动态预测到2030年中国食物消费需求变化。在预测时对未来社会经济发展进行了一系列假设，包括人口、经济发展、居民收入、科技进步等因素。

根据中国膳食指南、EAT-柳叶刀、地中海饮食、少肉膳食四种膳食模式，分别设计了四种模拟方案，模拟分析假设2020-2030年期间，中国城乡居民逐步改变膳食习惯，并在2030年调整到上述四种膳食模式推荐的食物消费水平后，带来的温室气体排放量的变化。

模拟方案1：模拟中国膳食指南的影响。参照《中国居民平衡膳食宝塔（2016）》中推荐的各种食物的摄入量范围，选取膳食宝塔对每类食物建议范围的平均值作为调整依据。

模拟方案2：模拟EAT-柳叶刀膳食模式的影响。依据《人类世的食物：EAT-柳叶刀可持续食物体系及健康饮食委员会特别报告》推荐的每人每天所需的食物种类及数量设定模拟方案。

模拟方案3：模拟地中海饮食模式的影响。根据地中海饮食基金会（2011）和Davis等（2015）对地中海饮食定义的综述研究设定模拟方案。

模拟方案4：模拟少肉膳食模式的影响。在膳食宝塔建议的基础上，将畜肉和禽肉分别减少到膳食宝塔的1/7和1/2（Springmann等，2018），同时增加水果、蔬菜、大豆等植物性食物的消费。

表4 模拟方案设定

食物类别 <sup>1)</sup>	基期 <sup>2)</sup>	基准方案 <sup>3)</sup>	模拟方案 1 <sup>4)</sup>		模拟方案 2 <sup>5)</sup>		模拟方案 3 <sup>6)</sup>		模拟方案 4 <sup>7)</sup>	
	(2020) <sup>8)</sup>	(2030) <sup>8)</sup>	《中国膳食宝塔》 <sup>9)</sup>		《EAT-柳叶刀》 <sup>10)</sup>		《地中海饮食》 <sup>11)</sup>		《少肉膳食》 <sup>12)</sup>	
	消费量 <sup>1)</sup> (克/天) <sup>2)</sup>	消费量 <sup>1)</sup> (克/天) <sup>2)</sup>	绝对值 <sup>1)</sup> (克/天) <sup>2)</sup>	变化率 <sup>1)</sup> (%) <sup>2)</sup>	绝对值 <sup>1)</sup> (克/天) <sup>2)</sup>	变化率 <sup>1)</sup> (%) <sup>2)</sup>	绝对值 <sup>1)</sup> (克/天) <sup>2)</sup>	变化率 <sup>1)</sup> (%) <sup>2)</sup>	绝对值 <sup>1)</sup> (克/天) <sup>2)</sup>	变化率 <sup>1)</sup> (%) <sup>2)</sup>
谷薯类 <sup>1)</sup>	409 <sup>2)</sup>	380 <sup>2)</sup>	325 <sup>2)</sup>	-14.5 <sup>2)</sup>	282 <sup>2)</sup>	-25.8 <sup>2)</sup>	260 <sup>2)</sup>	-31.6 <sup>2)</sup>	325 <sup>2)</sup>	-14.5 <sup>2)</sup>
水果 <sup>1)</sup>	161 <sup>2)</sup>	187 <sup>2)</sup>	275 <sup>2)</sup>	47.1 <sup>2)</sup>	200 <sup>2)</sup>	7.0 <sup>2)</sup>	250 <sup>2)</sup>	33.7 <sup>2)</sup>	350 <sup>2)</sup>	87.2 <sup>2)</sup>
蔬菜 <sup>1)</sup>	324 <sup>2)</sup>	354 <sup>2)</sup>	400 <sup>2)</sup>	13.0 <sup>2)</sup>	300 <sup>2)</sup>	-15.3 <sup>2)</sup>	600 <sup>2)</sup>	69.5 <sup>2)</sup>	500 <sup>2)</sup>	-41.2 <sup>2)</sup>
奶及奶制品 <sup>1)</sup>	53 <sup>2)</sup>	67 <sup>2)</sup>	300 <sup>2)</sup>	163.2 <sup>2)</sup>	250 <sup>2)</sup>	119.3 <sup>2)</sup>	250 <sup>2)</sup>	119.3 <sup>2)</sup>	300 <sup>2)</sup>	163.2 <sup>2)</sup>
猪肉 <sup>1)</sup>	77 <sup>2)</sup>	100 <sup>2)</sup>	32 <sup>2)</sup>	-67.2 <sup>2)</sup>	7 <sup>2)</sup>	-93.0 <sup>2)</sup>	6 <sup>2)</sup>	-94.0 <sup>2)</sup>	5 <sup>2)</sup>	-95.4 <sup>2)</sup>
肉类 <sup>1)</sup>										
牛羊肉 <sup>1)</sup>	17 <sup>2)</sup>	22 <sup>2)</sup>	7 <sup>2)</sup>	-67.2 <sup>2)</sup>	7 <sup>2)</sup>	-68.2 <sup>2)</sup>	6 <sup>2)</sup>	-72.7 <sup>2)</sup>	1 <sup>2)</sup>	-95.4 <sup>2)</sup>
禽肉 <sup>1)</sup>	45 <sup>2)</sup>	55 <sup>2)</sup>	19 <sup>2)</sup>	-65.8 <sup>2)</sup>	29 <sup>2)</sup>	-47.3 <sup>2)</sup>	17 <sup>2)</sup>	-69.1 <sup>2)</sup>	10 <sup>2)</sup>	-81.8 <sup>2)</sup>
蛋类 <sup>1)</sup>	35 <sup>2)</sup>	38 <sup>2)</sup>	45 <sup>2)</sup>	18.4 <sup>2)</sup>	13 <sup>2)</sup>	-65.8 <sup>2)</sup>	28 <sup>2)</sup>	-26.3 <sup>2)</sup>	45 <sup>2)</sup>	18.4 <sup>2)</sup>
水产品 <sup>1)</sup>	55 <sup>2)</sup>	71 <sup>2)</sup>	58 <sup>2)</sup>	-18.3 <sup>2)</sup>	28 <sup>2)</sup>	-60.6 <sup>2)</sup>	70 <sup>2)</sup>	-1.4 <sup>2)</sup>	58 <sup>2)</sup>	-18.3 <sup>2)</sup>
豆类 <sup>1)</sup>	39 <sup>2)</sup>	42 <sup>2)</sup>	* <sup>2)</sup>	* <sup>2)</sup>	75 <sup>2)</sup>	87.5 <sup>2)</sup>	50 <sup>2)</sup>	25.0 <sup>2)</sup>	50 <sup>2)</sup>	25.0 <sup>2)</sup>
植物油 <sup>1)</sup>	56 <sup>2)</sup>	59 <sup>2)</sup>	28 <sup>2)</sup>	-52.5 <sup>2)</sup>	47 <sup>2)</sup>	-20.3 <sup>2)</sup>	47 <sup>2)</sup>	-20.3 <sup>2)</sup>	28 <sup>2)</sup>	-52.5 <sup>2)</sup>
能量 (Kcal) <sup>1)</sup>	2800 <sup>2)</sup>	3000 <sup>2)</sup>	2300 <sup>2)</sup>		2310 <sup>2)</sup>		2280 <sup>2)</sup>		2250 <sup>2)</sup>	
蛋白质 (g) <sup>1)</sup>	75 <sup>2)</sup>	83 <sup>2)</sup>	68 <sup>2)</sup>		65 <sup>2)</sup>		68 <sup>2)</sup>		65 <sup>2)</sup>	
脂肪供能比 (%) <sup>1)</sup>	33 <sup>2)</sup>	36 <sup>2)</sup>	25 <sup>2)</sup>		22 <sup>2)</sup>		26 <sup>2)</sup>		26 <sup>2)</sup>	
碳水化合物供能比 (%) <sup>1)</sup>	40 <sup>2)</sup>	36 <sup>2)</sup>	52 <sup>2)</sup>		55 <sup>2)</sup>		50 <sup>2)</sup>		50 <sup>2)</sup>	

注：\*膳食宝塔中未直接给出豆类的参考量。<sup>1)</sup>

根据《中国居民膳食营养素参考摄入量（2013版）》建议，对于成年人来说，轻体力劳动者每天能量摄入量男性为2250kcal，女性为1800kcal；中、重体力劳动者或活动量大的人，每天能量摄入应适当增加300-500kcal。蛋白质最佳摄入量为55克-65克，脂肪供能比为20%-30%，碳水化合物供能比为50%-65%。

## 附录7 研究展望

需要说明的是，本章仍有一定的局限性，有待于将来进一步研究。第一，仅分析了几种代表性的健康膳食模式，未考虑到中国的地区差异，如不同地区的食物供应状况和膳食文化传统等，没有细分不同地区的健康膳食模式，提出更加可行的膳食指导建议。第二，也未考虑健康可持续膳食的成本和居民的可负担性。第三，未考虑加工食品和食用盐过量摄入以及运动不足带来的营养健康问题，例如，儿童含糖饮料摄入过多、谷物过度精加工等问题。