



天津商业大学
TIANJIN UNIVERSITY OF COMMERCE

天津市制冷技术重点实验室
Tianjin Key Lab of Refrigeration Technology



ICFET

工程热物理基础及工程国际联合研究中心
International Centre in Fundamental and Engineering Thermophysics

全程冷链食品碳足迹与减排思考

天津商业大学
刘斌

中国制冷展, 2022.8.2

TIANJIN UNIVERSITY
OF COMMERCE

笃学 弘毅 明德 济世
DUXUE HONGYI MINGDE JISHI



主要内容

- 碳的力量
- 食品冷链中的碳
- 冷链碳足迹
- 减排方法探讨
- 碳足标识
- 结束语



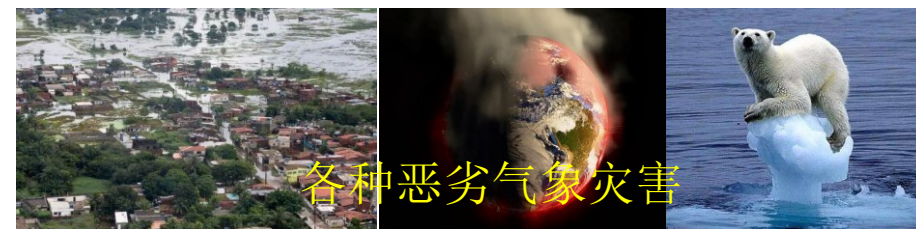
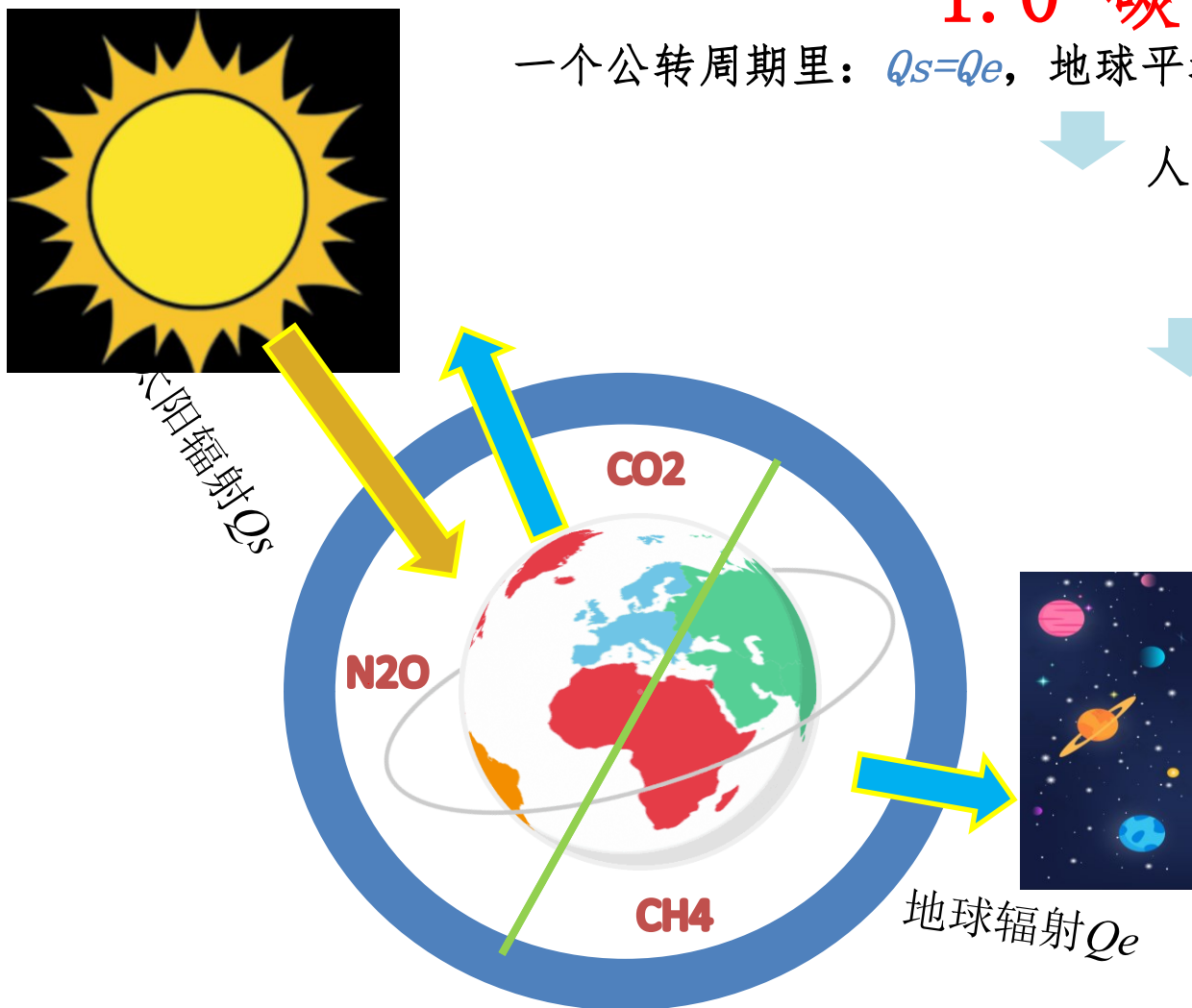
1.0 碳的力量

一个公转周期里： $Q_s=Q_e$ ，地球平均温度维持稳定，但实际上这个温度是每年波动的。

人为因素导致一些吸收地球辐射的气体物质增加

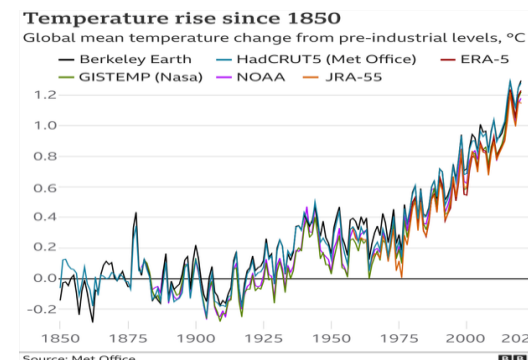
Q_e 变小，在整个20世纪全世界的平均温度攀升了0.6℃

北半球春天的冰雪解冻期比150年前提前了9天，而秋天的霜冻开始时间却晚了10天。



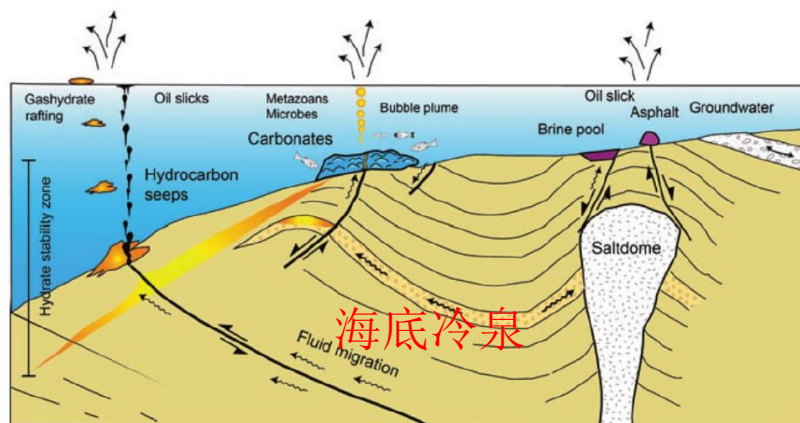
各种恶劣气象灾害

IPCC预计2040 年前后地球表面变暖将达到 1.5℃，海平面升高1.5米。



1.1 碳源（自然活动）

《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）将“**碳源**”定义为向大气中释放CO₂的过程、活动或机制





1.1 碳源（人类活动）

《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）将“**碳源**”定义为向大气中释放CO₂的过程、活动或机制

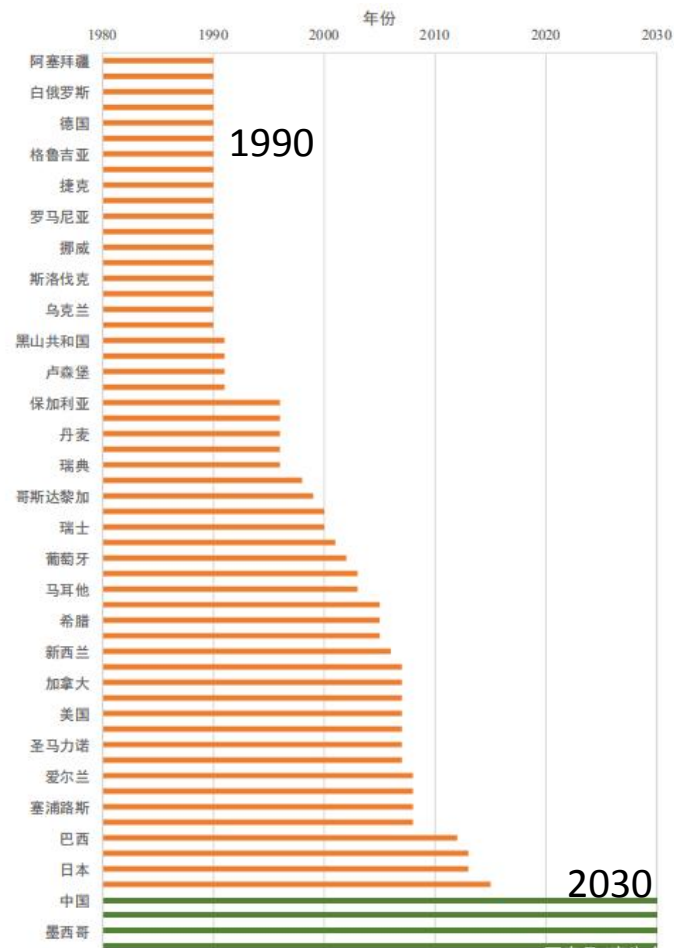
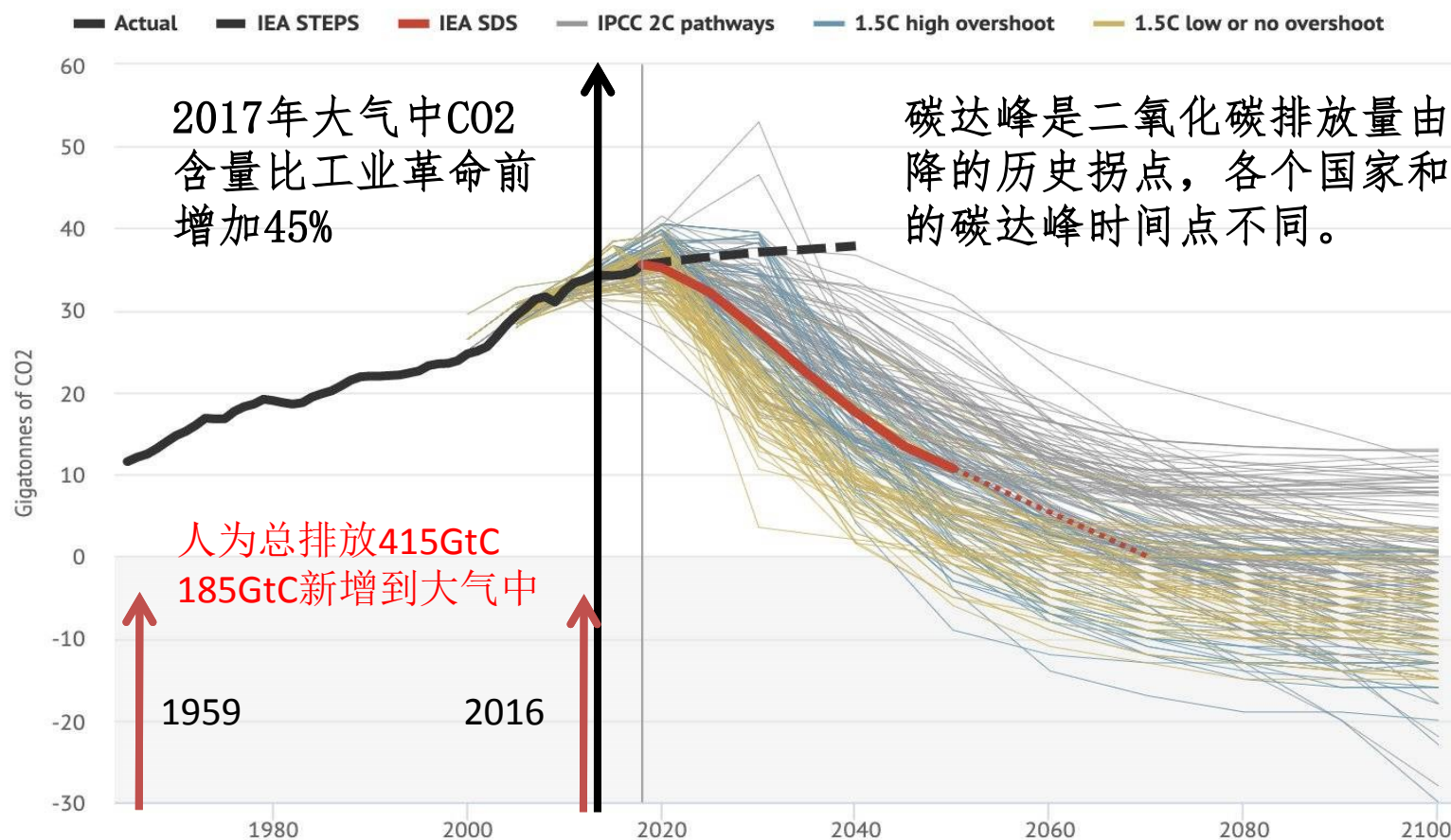


1.2 碳排放和碳达峰

碳排放是指人类生产活动所排放的温室气体排放量

Global CO₂ emissions in the **IEA SDS** lie above most **IPCC 1.5C low overshoot pathways**

The IEA says its SDS corresponds to a 50% change of limiting warming to 1.65C and a 66% chance of 1.8C



1.2 碳排放及碳达峰

2018年，中国的总碳排放量约为103亿吨，世界总碳排放量约为34,0亿吨。我国人均碳排放量中国约为7.56吨，全世界约为4.5吨，美国是16.85吨。预估我国碳排放峰值为 117~127 亿吨。

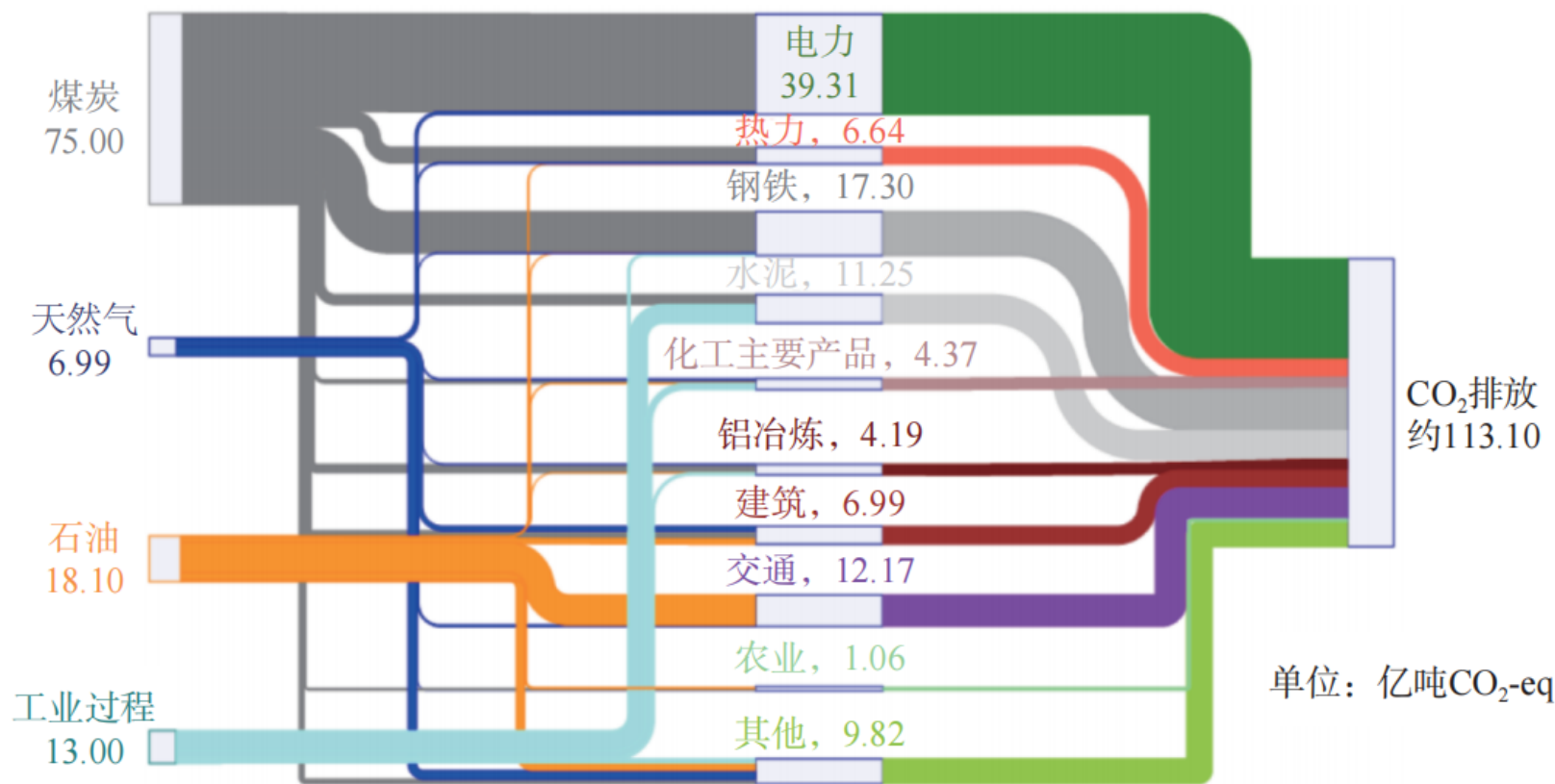
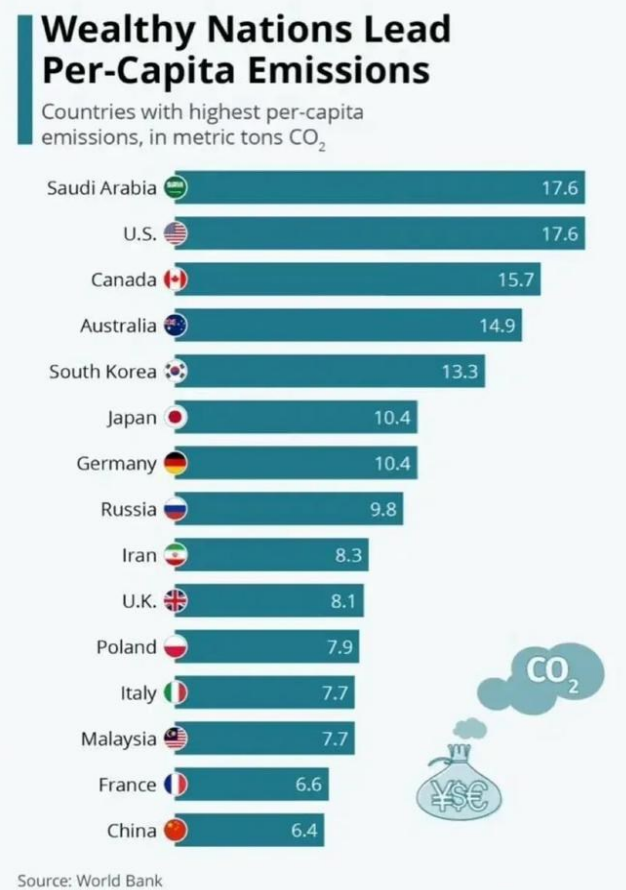
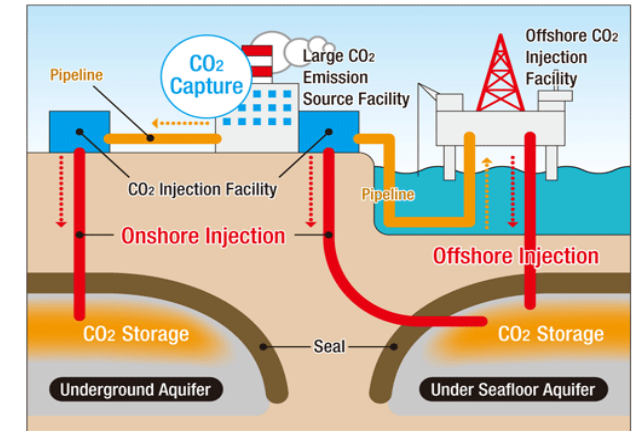
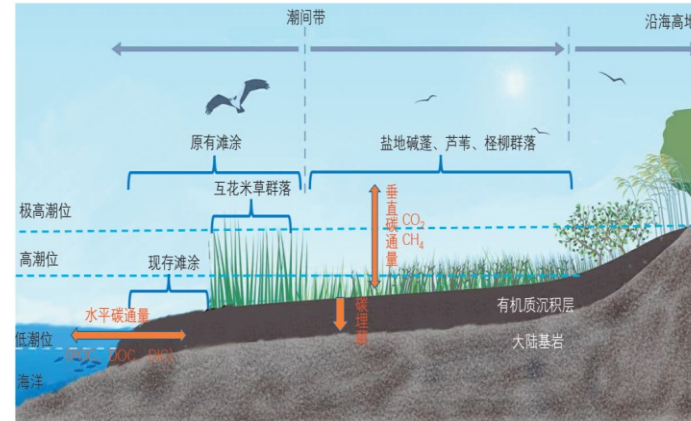
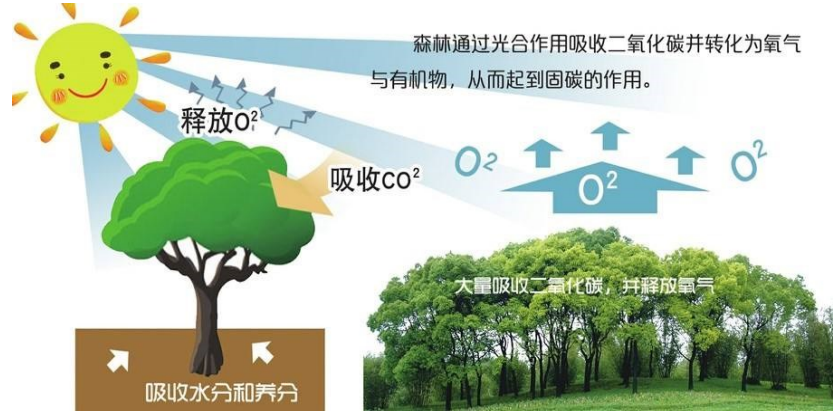


图 1 2020 年全国碳流图（含工业过程排放）

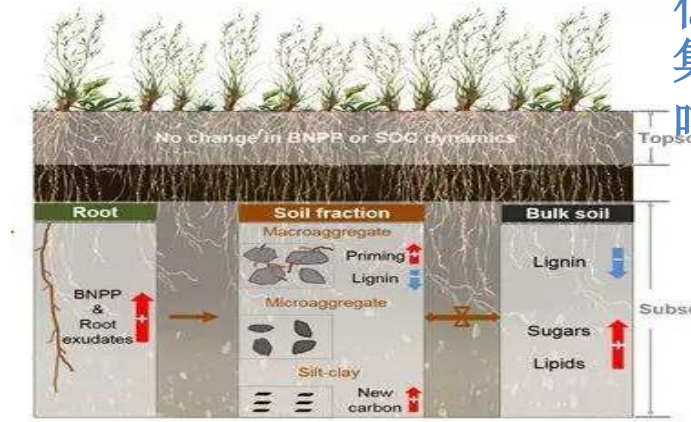
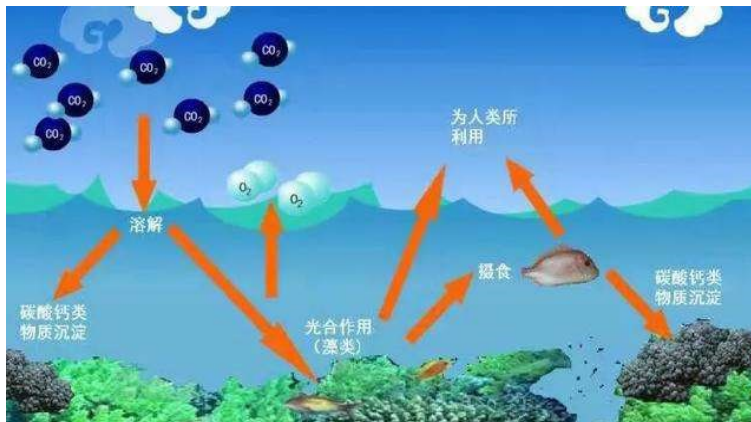


1.3 碳汇及碳中和

《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）将“碳汇”定义为从大气中清除CO₂的过程、活动或机制

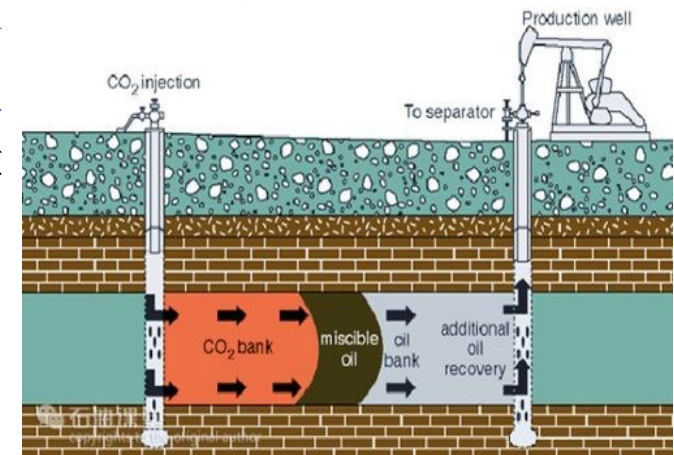


陆地和海洋大约捕集了人类排放总量的50%
我国境内陆地碳捕集量只有10亿吨（自然活动）



2060年我国
碳排放量21
亿吨，碳捕
集约需11亿
吨，实现碳
中和

人类碳捕集技术（人类干涉）

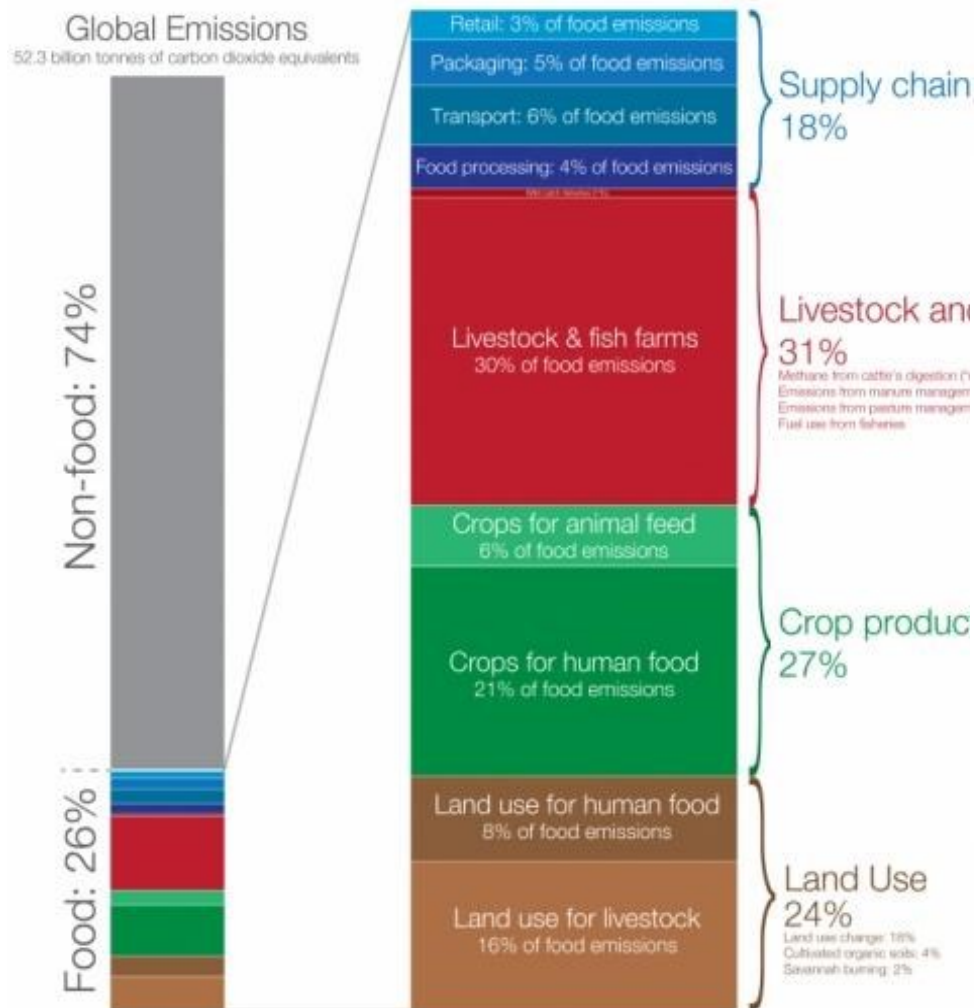


2.0 食品中的碳

2018年《Science》

全球范围内：**食物及相关产业链贡献了全球26%的温室气体排放**。其中，畜牧业和渔业贡献了31%的碳排放，作物种植贡献了27%，对森林、草地的土地占用贡献了24%，供应链相关碳排放贡献了18%

Global greenhouse gas emissions from food production Our World in Data



我国以全世界7%的土地养育了22%的人口,创造了世界奇迹。不过,当前我国还面临耕地紧张、水资源短缺与农业污染等严峻形势,土地的可持续投入与粮食增产压力全面上升。节粮减损等同于粮食增产,是增加粮食有效供给的“无形良田”,是保障粮食安全的有效途径。研究表明,每生产1千克食物,意味着5.22千克二氧化碳、220克氮和40.56克磷的排放。开展全过程节粮减损行动,需要以全链条绿色技术攻关为前提,实现粮食产业走上绿色可持续发展道路,推动全社会生产生活方式绿色化。“一粥一饭,当思来之不易;半丝半缕,恒念物力维艰。”减少粮食损耗,也是弘扬勤俭美德的题中应有之义。

2.0 食品中的碳

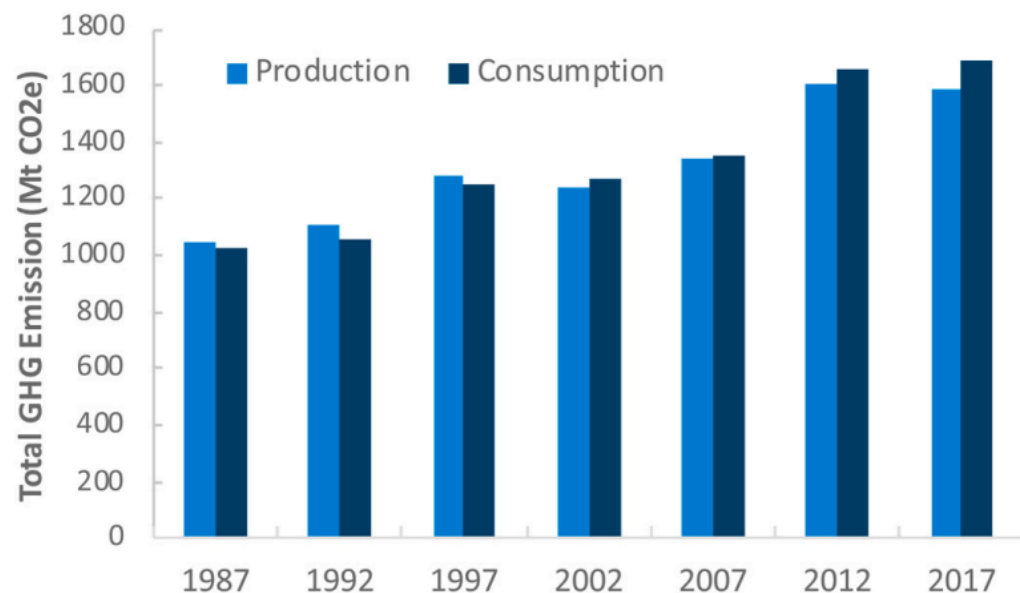


Fig. 1. GHG emissions from China's food production and consumption (1987–2017).

中国食物生产过程碳排放由1049Mt升高至1584Mt，但食物消耗碳排放由1028Mt升高至1685Mt，两者差距在于进口食品的增加。

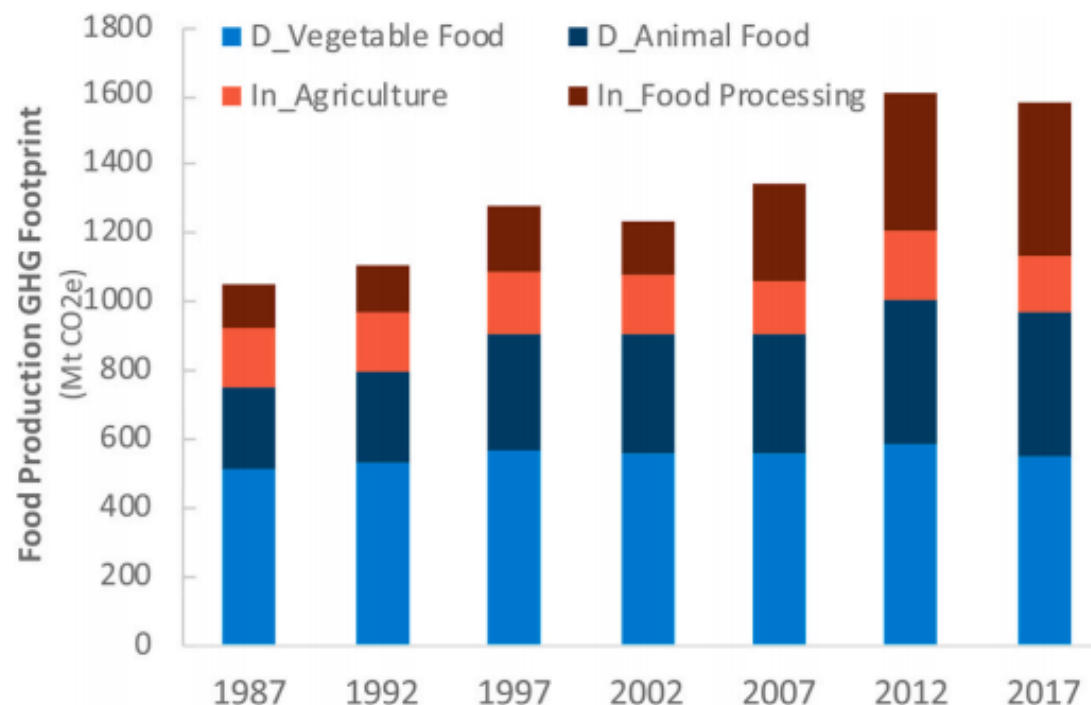


Fig. 2. Changing composition of China's food production GHG footprints.

我国蔬菜种植和动物养殖过程中的直接碳排放从73.2%降低至61.1%，而种植和食物处理过程中投入的材料、设备等的碳排放升高到38.9%。

3.0 冷链碳足迹

食品冷链物流是指易腐食品在加工、贮藏、运输、销售等各个环节中始终保持适宜的温度，最大限度的减少损耗并保持品质的流通过程。

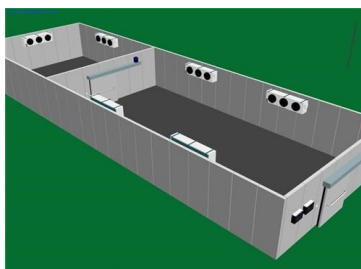
冷链典型全流程环节



生产



低温加工



低温储藏



低温运输



低温陈列



冰箱

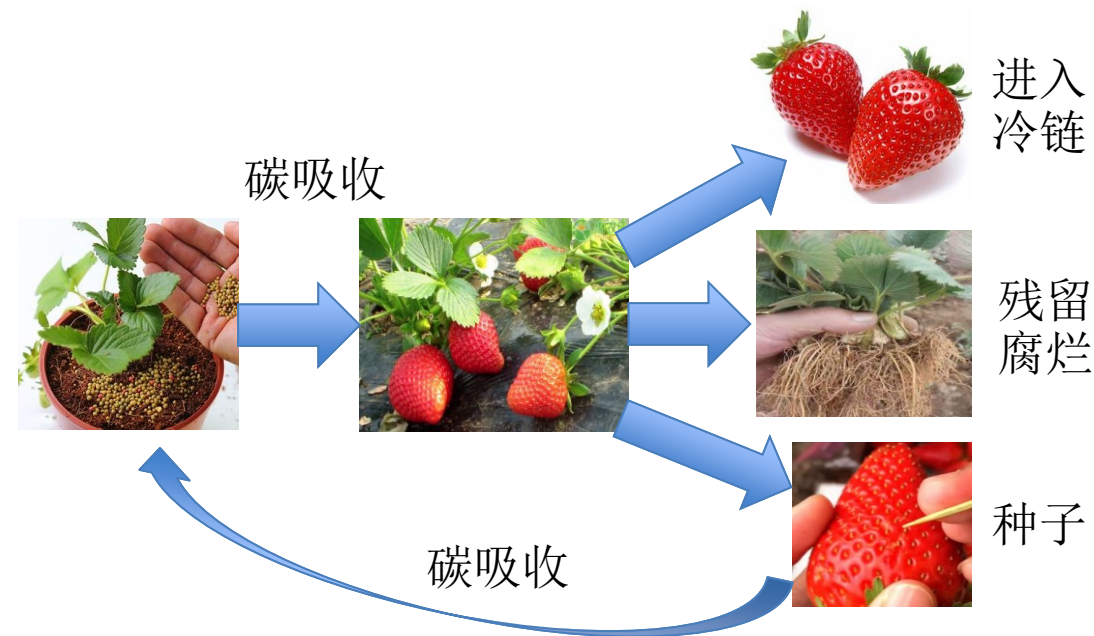
碳足迹 (Carbon Footprint) 是基于生态足迹的概念，最早在英国被提出为定量评价人类活动对全球气候变化的影响，用来衡量某种活动引起的（或某种产品在其生命周期内积累的）直接和间接温室气体总排放量

生命周期分析法 (LCA)：生命周期评价法是一种自下而上的碳足迹核算方法，涵盖从生产源头到产品消费及其产生的废弃物处置的全过程，其分析结果具有较强的针对性，适用于微观尺度的碳足迹核算。是国际标准化组织认可的碳足迹核算方法。

• 3.1 食品生产过程碳排放

• (1) 果蔬生产碳吸收

- 果蔬生产过程，会进行光合作用，将空气中和土壤中的碳吸收然后转化成自身有机成分，实现碳的吸收。
- 蔬菜及部分水果，生命周期短，除去可食用部分外，其他部分会根据需求进行处理，此处只考虑可食用部分的碳吸收量，通过获得采收时蔬菜可食用部分的重量及里面有机成分中碳的含量即可计算出整个生长过程蔬菜的碳吸收： $CS_V = m * \sum(a_i * b_i) / c$
- a-有机物i含量，b-有机物i中碳元素含量，c-二氧化碳中碳含量





大部分水果往往是多年生树木上结的果，树木生长过程的碳吸收生成的有机物一部分供给果实，一部分用于自身根树干等的生长：

$$CS_F = m_1 * (\sum a_i * b_i / c + m_2 * \sum a_i * b_i / c)$$

m_1 -果实经济产量

m_2 -不同年份果树，果实生长周期内，生产单位质量果实，根径等的平均质量增加。

在实际计算过程中， m_2 受地理位置、管理、品种等复杂情况的影响，在食品冷链中往往忽略。



• (2) 现代农业果蔬生产碳排放

- 农用化肥产生的碳排放：氮肥（尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ）、磷肥、钾肥、复合肥的碳排放系数分别为857.54、165.09、120.28、380.97 kg/t。每生产1kg氮肥向大气中排放8.21kg CO_2 。另一方面合理施肥能够增加土壤有机碳含量。
- 施用农药产生的碳排放，包含农药自身分解、喷洒机械等：4937.28 kg/t
- 使用农膜产生的碳排放； $C=5180$ kg/t
- 农用机械燃烧柴油碳排放；16.47kg/hm²
- 翻耕果蔬土地产生碳排放；312.6 kg/km²
- 果蔬灌溉引起的碳排放量：20.476 kg/hm²
- $CE = \sum \mu_i * C_i$

还应考虑上述设备材料上游生产碳排放





(3) 现代农业果蔬生产净碳排放量

$$NC=CE-CS$$

农业碳足迹的评价指标包括碳强度指标和碳效率指标：

碳强度指标主要包括土地碳强度 ($\rho = CE/H$)、产量碳强度 ($\rho = CE/Y$)

收益碳强度 ($\rho = CE/I$)；

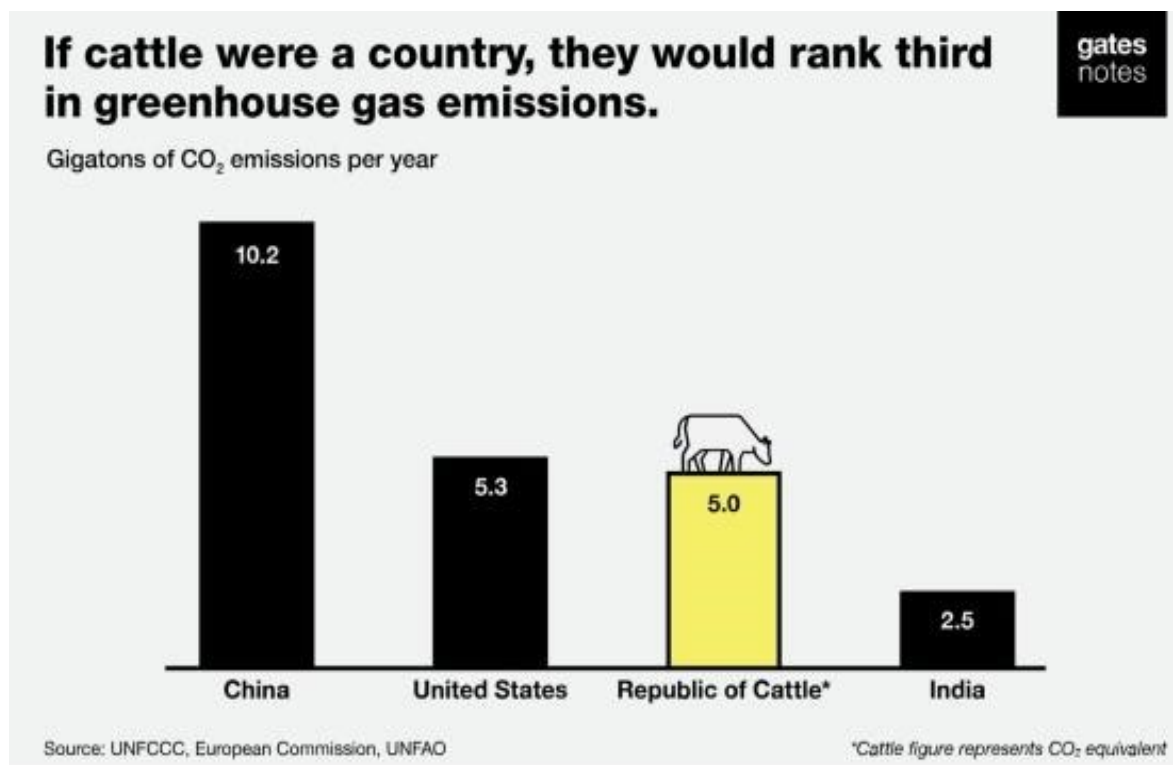
平均而言：每生产 1 kg 蔬菜的碳足迹约为0.26 kg CO₂，每生产1kg水果的碳足迹约为0.89kg CO₂。

碳效率指标主要包括碳生态效率 (CS/CE)、碳生产效率 (Y/CE) 和碳经济效率 (I/CE)



(4) 肉类生产过程碳排放

以牛肉为例：



在所有动物性食品中，牛肉和牛奶生产，是畜牧业二氧化碳和甲烷排放的主要来源，两者的排放量分别占畜牧业排放总量的41%和20%；而猪肉、禽肉禽蛋分别占比9%和8%。

在100年的时间框架内甲烷的GWP是二氧化碳的28倍；在排放之后的20年时间里，重量相同的情况下，甲烷造成的变暖趋势是二氧化碳的86倍。

下表为主要畜禽肠道和粪便的甲烷排放系数

种类	奶牛	肉牛	猪	羊	家禽
CH ₄ 排放系数 (kgCH ₄ / head/y)	84	53	4.5	8.8	0.02

可以推测：随着碳定价机制的完善，养牛过程产生碳排放会导致牛肉及牛奶等相关产品价格的升高。



• 3.2 预冷及速冻过程碳排放

• (1) 预冷

- **预冷**是将采收的新鲜果蔬、肉、鱼等在贮藏、运输之前，尽早除去原有热量，冷却到预定温度（高于0℃）的过程。
- 假设果蔬比热容取为 $3.9 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，1 kg果蔬温度从 25°C 降到 5°C ，失去的热量为78 kJ，但预冷过程必定需要设备，设备提供的冷量只有一部分用于食品的降温，取比例为 α ，该值受多种因素影响，此处可以采用设计时各负荷分配的计算值，比如苹果差压预冷可取0.8，库板为150mm聚氨酯板。COP取2.5，耗电量为 $1.08 \times 10^{-2} \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ，碳排放量为 $8.48 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 。



3.3 储藏过程碳排放

- 储存环节的温室气体排放来源于制冷设备电耗和制冷剂泄漏，包括批发商储存、零售商储存、消费者储存三个环节。

项目	活动	数据	数据类型
存储	批发商和零售商冷藏	2.36×10^{-4} kg/(day*kg) (冷藏库)	碳排放
销售	冷藏销售环节	3.57kg/(m ² · day)	碳排放
存储	冰箱存储	3.175×10^{-4} kg/(day*kg)	碳排放

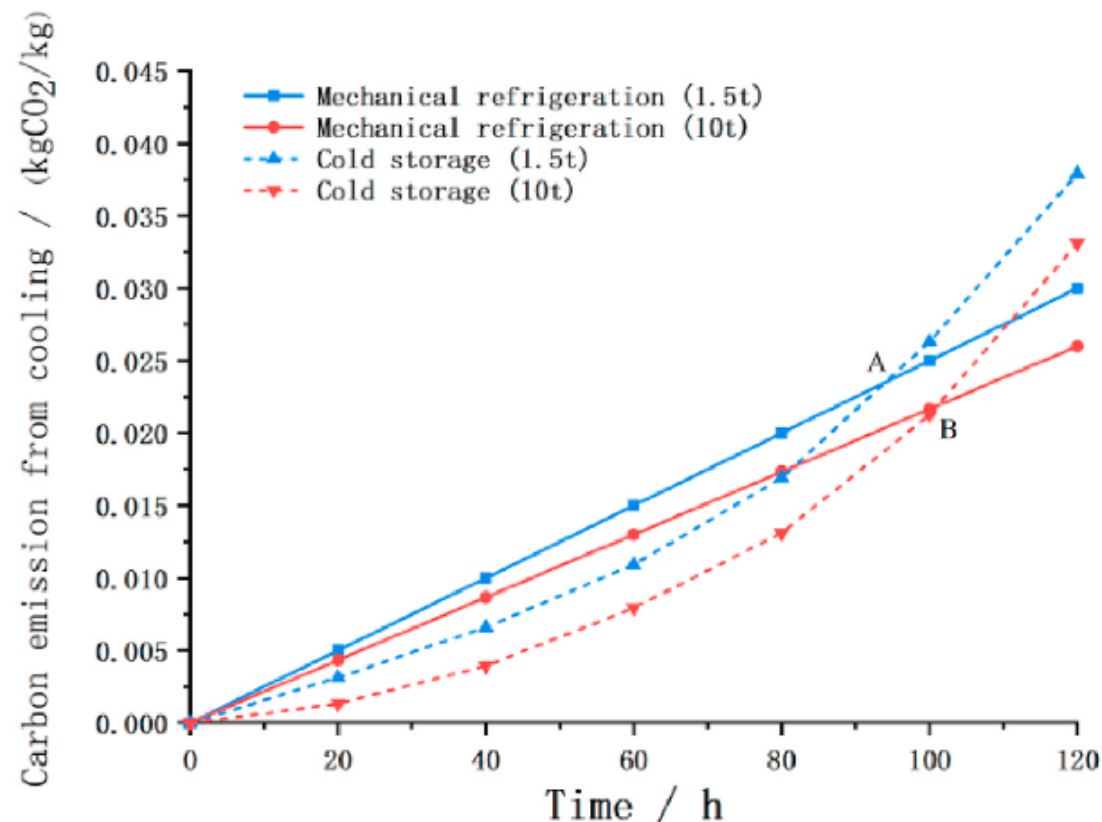


Fig. 7. Changes in carbon emissions from cold storage and mechanical refrigeration transportation with time.

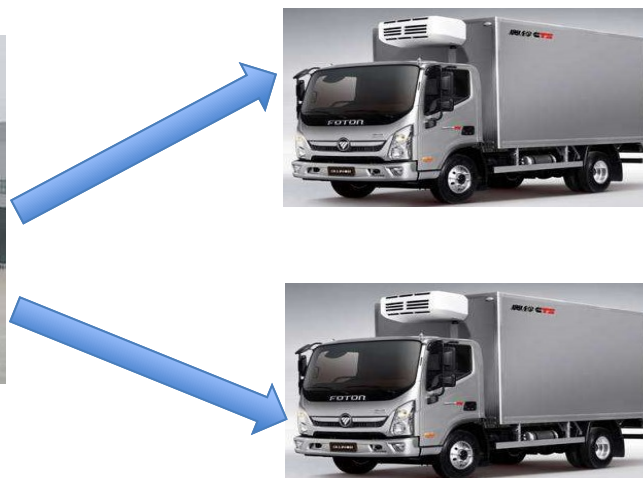
3.4 运输过程碳排放

(1) 行驶碳排放:

以全程采用燃油车的情况为例: $C = C_h + C_l$

$$C_h = \frac{F_h \cdot C_f}{T_h}$$

$$10T: C_h = 7.51 \times 10^{-5} \text{ kgCO}_2/(\text{kg} \cdot \text{km})$$



$$1.5T: C_l = 2.92 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_2/(\text{kg} \cdot \text{km})$$

$$C_l = \frac{F_l \cdot C_f}{T_l}$$

F为卡车油耗, C为单位油耗的碳排放量, T为载重

运输	小型货车 (1 t-1.5 t)	0.1667 L/km	行驶油耗	Poritosh (2008) ^[12]
	重型货车 (10 t)	0.2857 L/km	行驶油耗	Poritosh (2008) ^[12]

• (2) 制冷碳排放

- 运输全程所需冷量全部用于冷藏箱围护结构传热量和内部食品自身产热。若贮藏为果蔬，自身产热为果蔬的呼吸热。
- 以预冷后果蔬为例：
- 若采用相变蓄冷模式，只考虑正常使用阶段碳排放：
- $C_{tc} = M_l * r * n * \gamma / (L * T)$
- M_l 载冷剂质量kg； r 载冷剂相变潜热kJ/kg； n 充冷次数； γ 电网CO2排放因子； L 为运输距离，km。

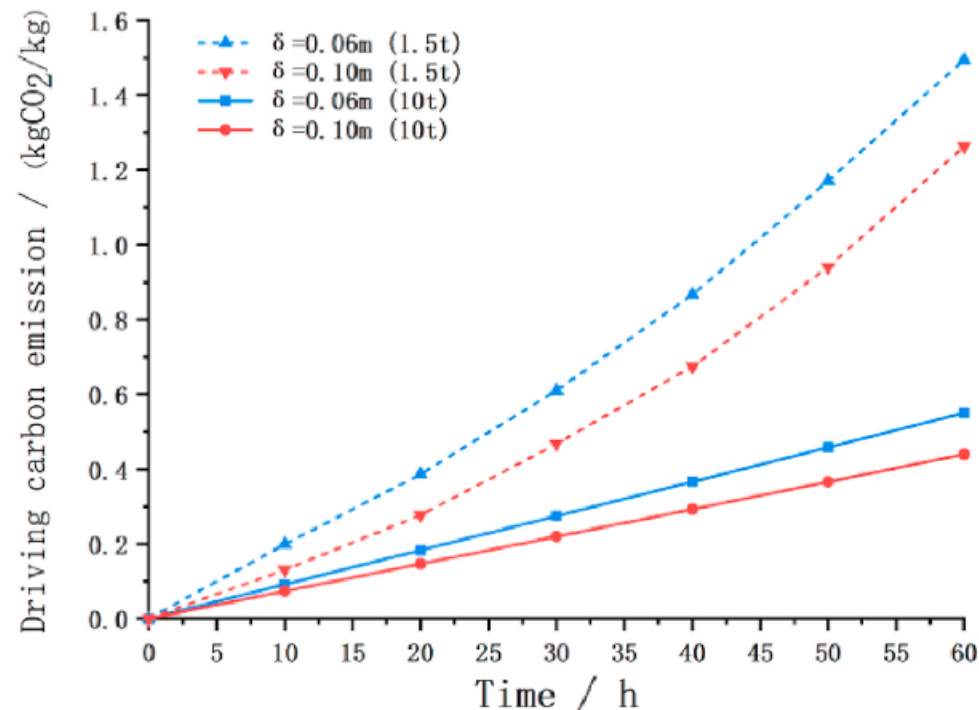


Fig. 5. Changes in driving carbon emissions per unit mass of fruits and vegetables with transportation time.

- (2) 制冷碳排放
- 若采用机械制冷模式，
- 从燃料角度分析，截止 2019 年，我国以柴油、汽油、天然气和电动为驱动力的冷藏车数量占比约为 89.9%、6.4%、2.1%和 1.6%。柴油的碳排因子设定为 $0.267\text{kg CO}_2/\text{kWh}$ ，COP为2。
- 同时还需考虑制冷剂泄漏带来的碳排放量：冷藏车主要使用R404A和R410A作为制冷剂，运输过程中的制冷剂泄漏量平均每年为制冷剂充注量的10%~37%，小型货车上制冷装置的制冷剂充注量约为2 kg，中型卡车的制冷剂充注量约为5 kg。

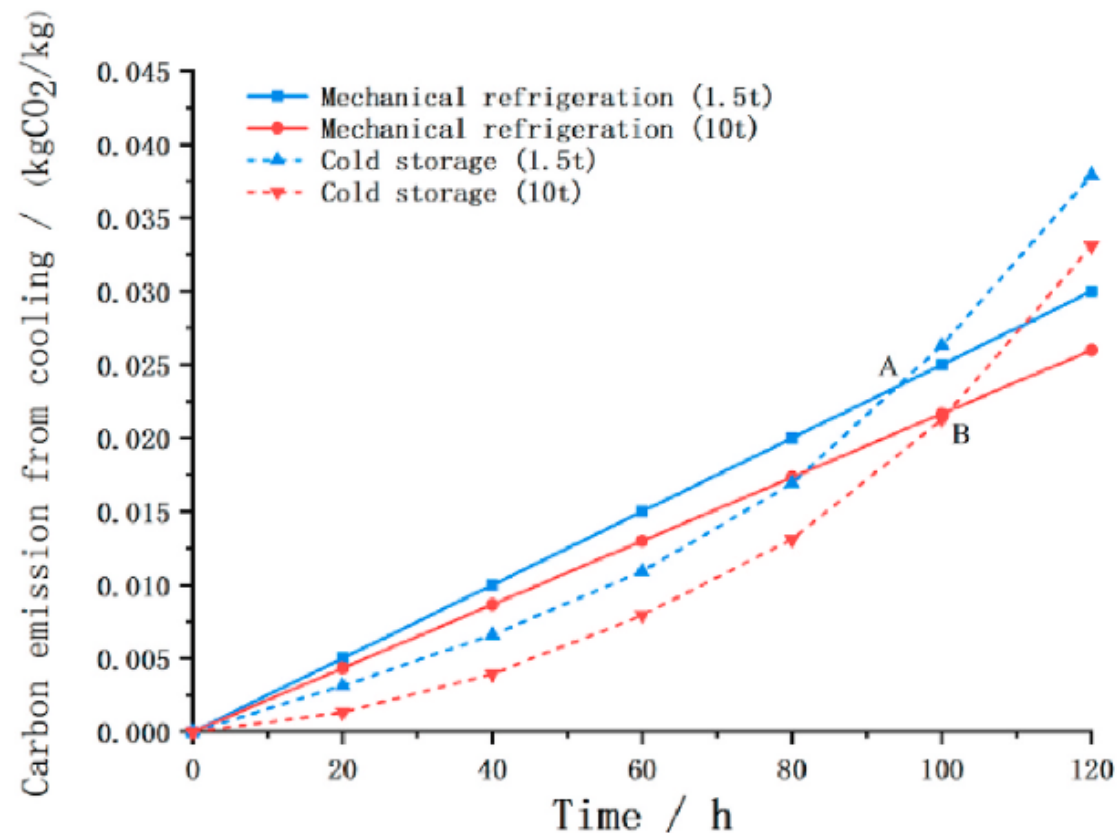


Fig. 7. Changes in carbon emissions from cold storage and mechanical refrigeration transportation with time.

3.5 冷链过程碳排放

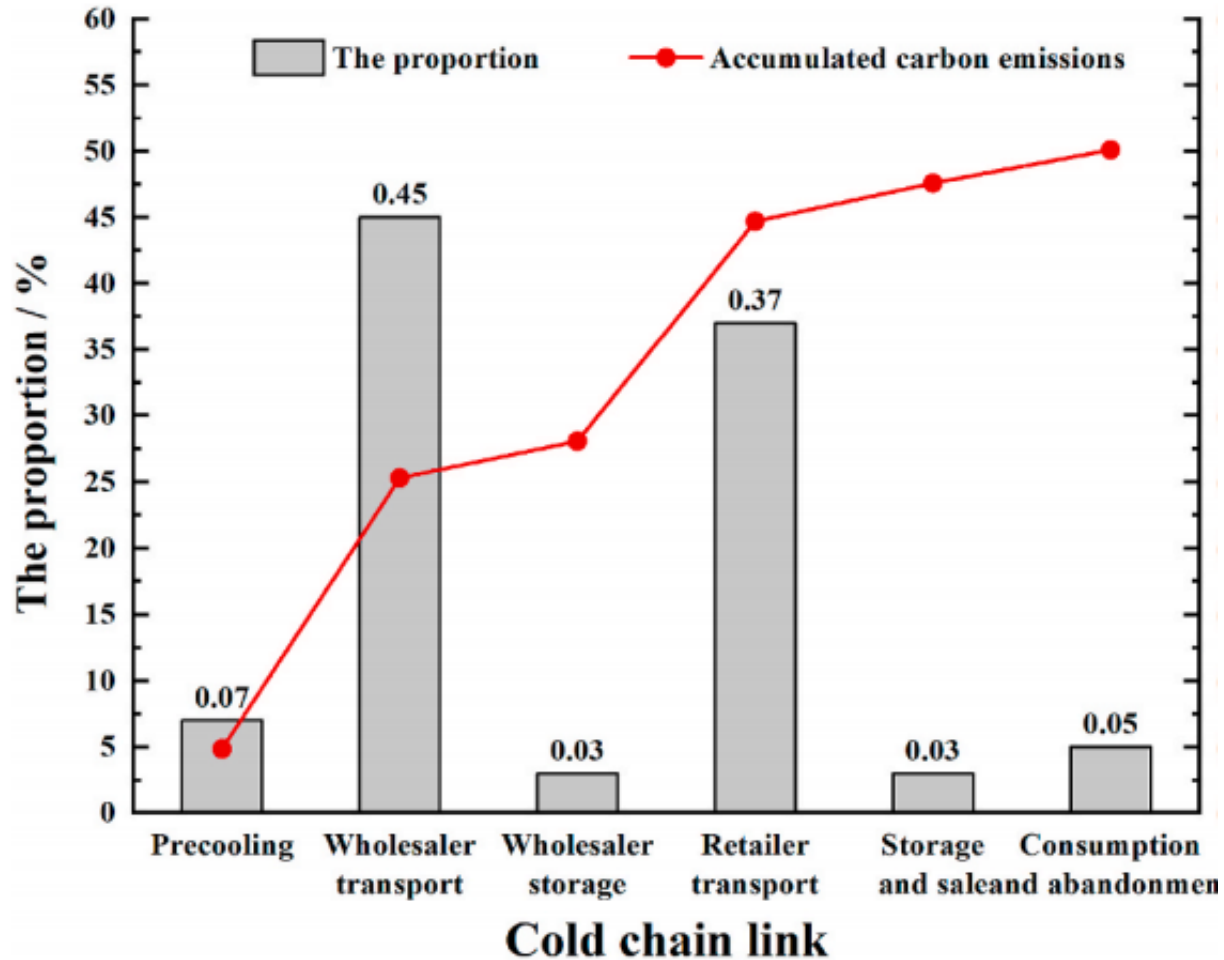


Table 2

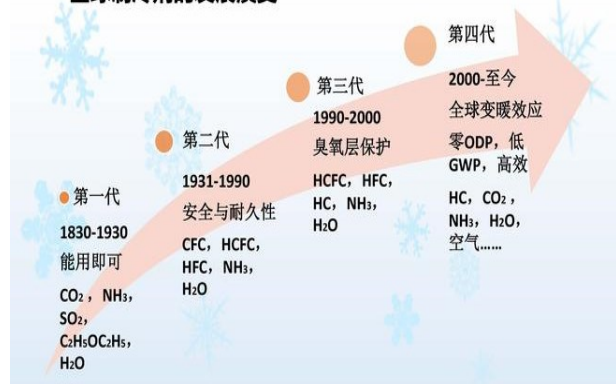
Carbon footprint of each link in the fruit and vegetable cold chain.

cold chain link	carbon emission activity data		time	total carbon emission
producers	pre-cooling:	30 °C-4 °C	/	7.144×10^{-3}
wholesalers	manufacturer to wholesaler transport (10T): cold storage transport	cooling: Eq. (7) driving: Eq. (8)	7h	8.28×10^{-4}
	wholesaler storage:	$2.355 \times 10^{-4} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{day})$	240h	2.355×10^{-3}
	refrigerant leakage (storage):	$5.644 \times 10^{-5} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{day})$		5.644×10^{-4}
retailers	manufacturer to wholesaler transportation (1.5T): mechanical refrigeration	cooling: Eq. (11) driving: $2.92 \times 10^{-4} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{km})$	2h	4.3×10^{-4}
	refrigerant leakage:	$6.87 \times 10^{-6} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{km})$		8.244×10^{-4}
	retailer storage:	$2.355 \times 10^{-4} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{day})$	168h	1.649×10^{-3}
consumers	refrigerant leakage (storage):	$5.644 \times 10^{-5} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{day})$		3.951×10^{-4}
	display cases refrigerated for sale:	$6.366 \times 10^{-4} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{day})$	24h	6.366×10^{-4}
	consumer storage:	$3.175 \times 10^{-4} \text{kg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{day})$	48h	6.35×10^{-4}
abandoned	loss:	41.21g CO ₂ /kg	attrition rate (10%)	4.12×10^{-3}

4. 冷链食品的减碳方法

1. 增加食品参与冷链比例，建设损耗
2. 减少全程冷链过程中的负荷来源，如减少维护结构负荷、减少操作负荷等；
3. 采用环保制冷剂，减少使用具有GWP和ODP效应的制冷剂
4. 在适合区域采用自然冷源
5. 采用光伏、风能结合的分布式直流供能模式
6. 采用蓄冷，调节电网峰谷涉及蓄冷剂研发

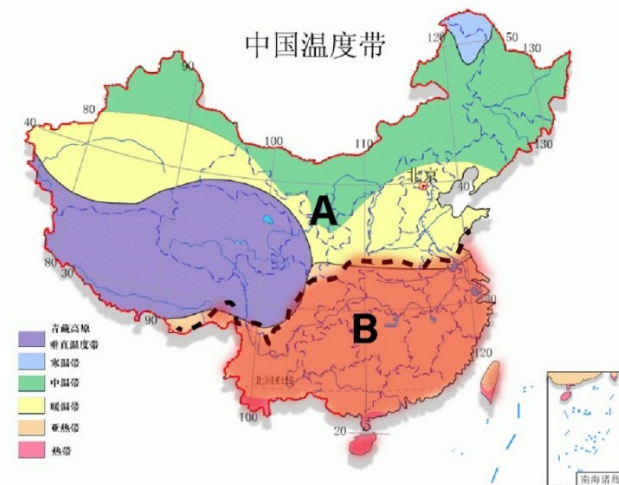
全球制冷剂的发展演变



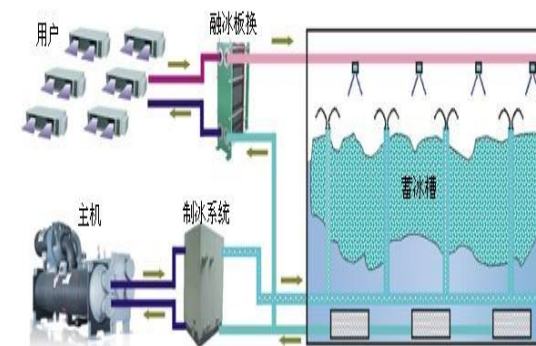
制冷剂发展路径



冷库屋顶光伏发电



5°C为自然冷源的区域线（90天）

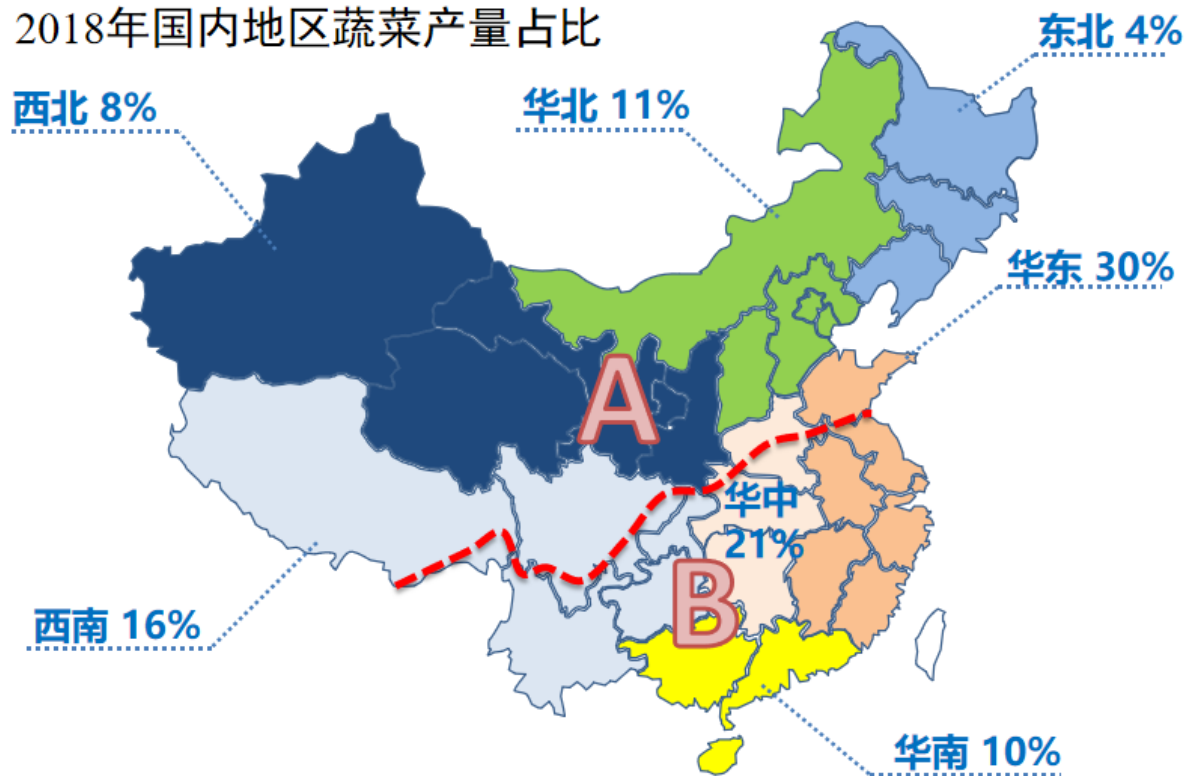


蓄冷系统



自然冷源利用

2018年国内地区蔬菜产量占比



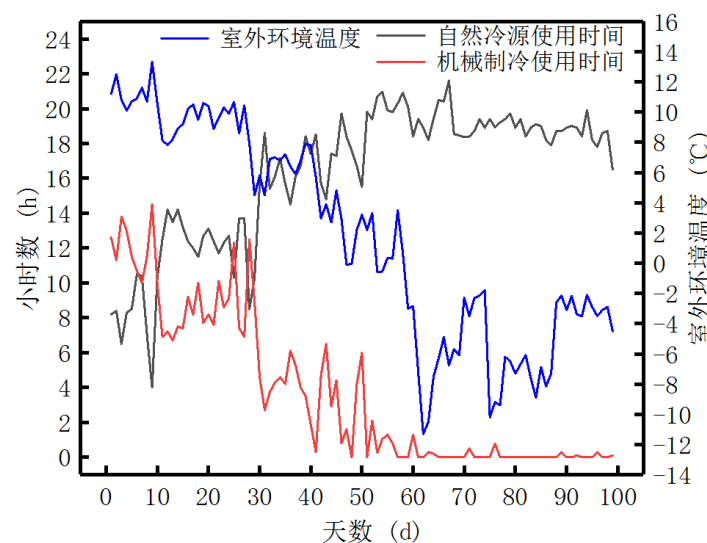
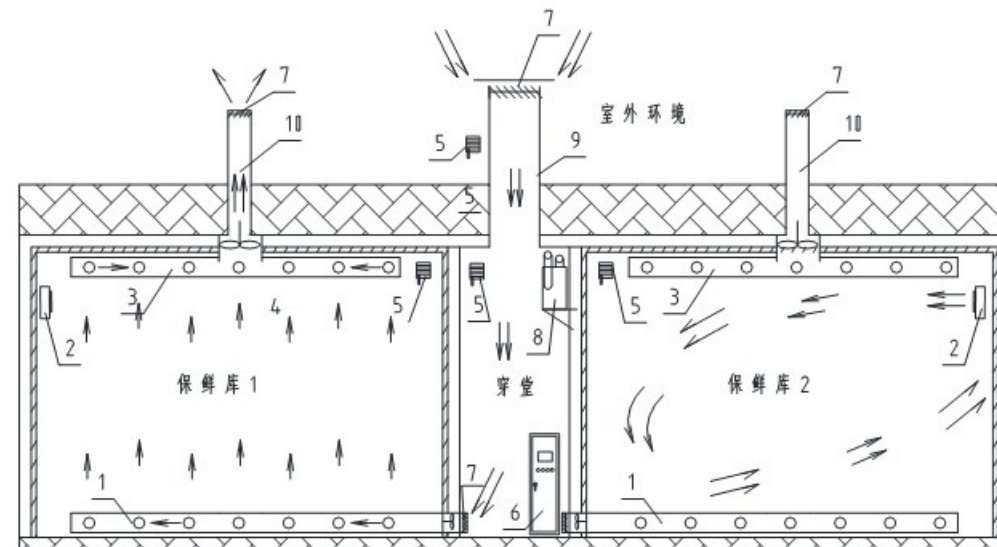
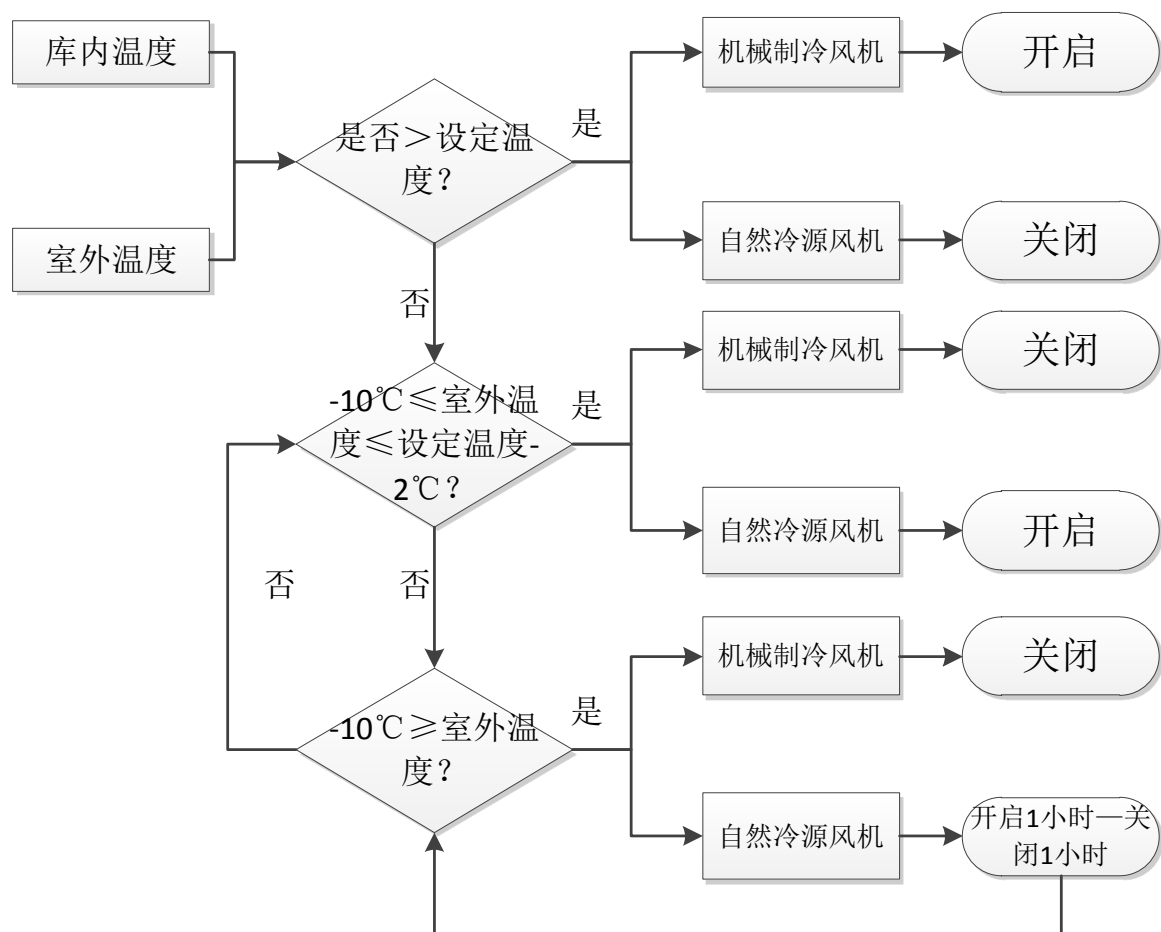
自然冷源利用技术

蓄冷等技术利用

- 热管蓄冷技术
- 箱裙式制冰技术
- 自然冷源土壤蓄冷技术
- 数据机房空调
- 自然冷源玉米干燥技术
- 家用自然冷源空调
- 自然冷源家用冰箱

自然冷源果蔬保鲜

- 玉米贮藏库
- 热管自然冷源库
- 自然冷源粮仓
- 马铃薯自然通风库
- 寒富苹果保鲜库
- 油豆角自然冷源保鲜库
- 芹菜、草莓自然冷源保鲜库



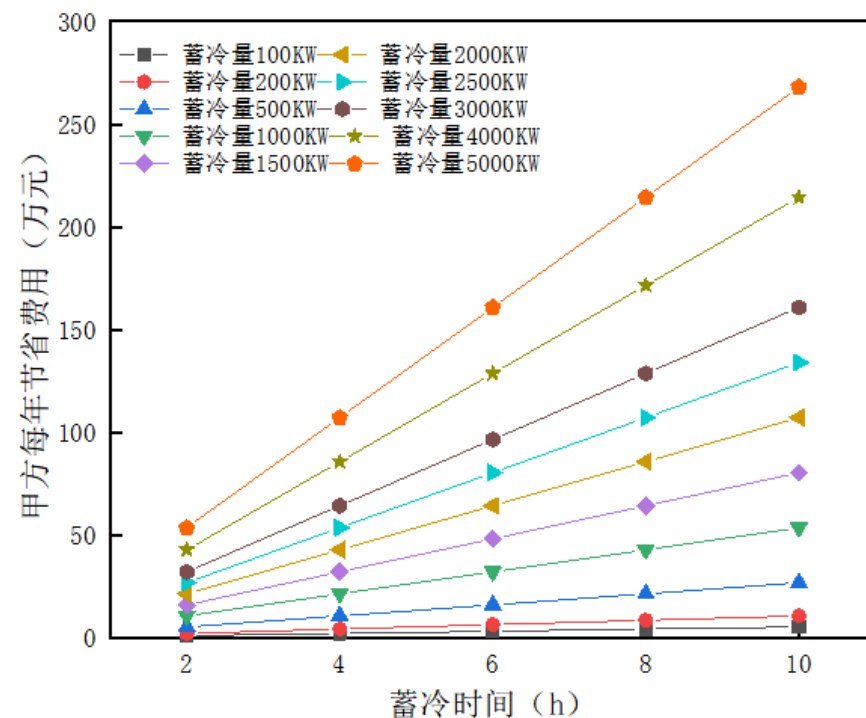
自然冷源和机械制冷双向切换库对比单一的使用机械制冷节约能耗76.34%。



蓄冷冷库

各省市峰谷电价：

省市	峰电价	谷电价	峰谷差
上海市	0.991	0.278	0.713
江苏省	1.0697	0.3139	0.7558
浙江省	1.3377	0.5097	0.828
天津市	1.1174	0.4661	0.6513
安徽省	1.0039	0.3716	0.6323



1 上海市不同蓄冷量下高温库甲方每年节省费用随蓄冷时间变化图



蓄冷应用在冷库中的节省运行成本的初步估算				
假设条件	初始间接冷却系统模式	NH3系统 R507A开启式压缩系统 R507A半封式压缩系统		
	规模	1万吨低温库		
	冷间温度℃	-20		
	蒸发温度℃	-31		
	假设制冷量kW	500		
	压缩机COP	2.05	1.96	1.66
	轴功率kW	243.9	255.1	301.2
	江苏谷电RMB	0.314	运行时间h	8.0
	江苏峰电RMB	1.070	运行时间h	4.0
	江苏平电RMB	0.642	运行时间h	4.0
传统方式	运行系数	0.8		
	正常每天电费估算(元)	2282.2	2387.0	2818.4
	正常每年电费估算(万元)	83.3	87.1	102.9
蓄冷方式	蓄冷剂温度℃	-30.0		
	蒸发温度℃	-33.0		
	压缩机COP	1.93	1.89	1.60
	轴功率kW	259.1	264.6	312.5
	蓄冷时间h	8.0		
	蓄冷运行系数	0.8		
	夜间蓄冷产生的电费估算(元)	520.5	531.5	627.8
	夜间制冷产生的电费估算(元)	612.5	640.6	756.4
	蓄冷每年电费估算(万元)	41.4	42.8	50.5
	每年节省电费估算(万元)	41.9	44.3	52.4
总结	与传统系统节省比例估算	50%		

SH-7 1# 参数表 冰点≤-55℃

温度 (℃)	比热 kJ/(kg·K)	导热系数 W/(m·K)	动力黏度 (mPa·s)	运动黏度 mm ² /s	密度 (g/m ³)
-50	2.30	0.4022	64.72	44.5856	1.45159
-45	2.29	0.4053	46.29	32.5397	1.42257
-40	2.30	0.4099	33.86	24.0462	1.40812
-35	2.33	0.4138	25.65	18.3042	1.40132
-30	2.34	0.4200	19.67	14.0547	1.39953



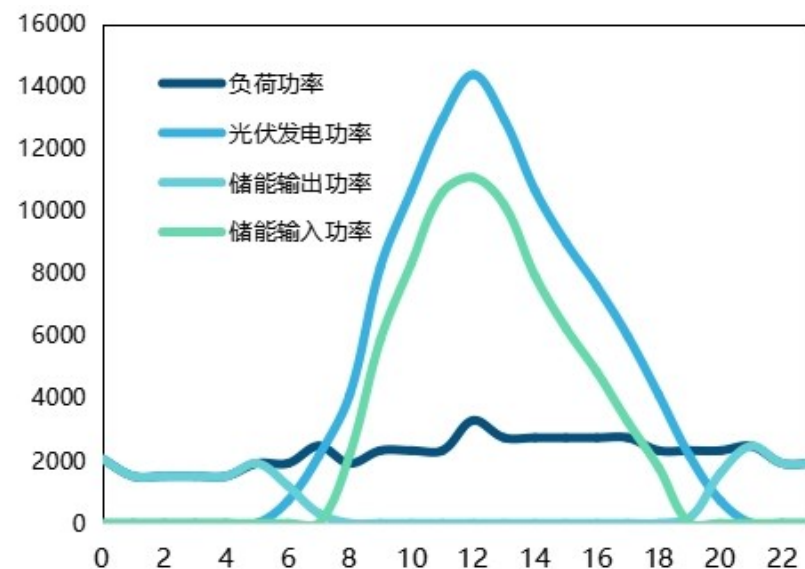
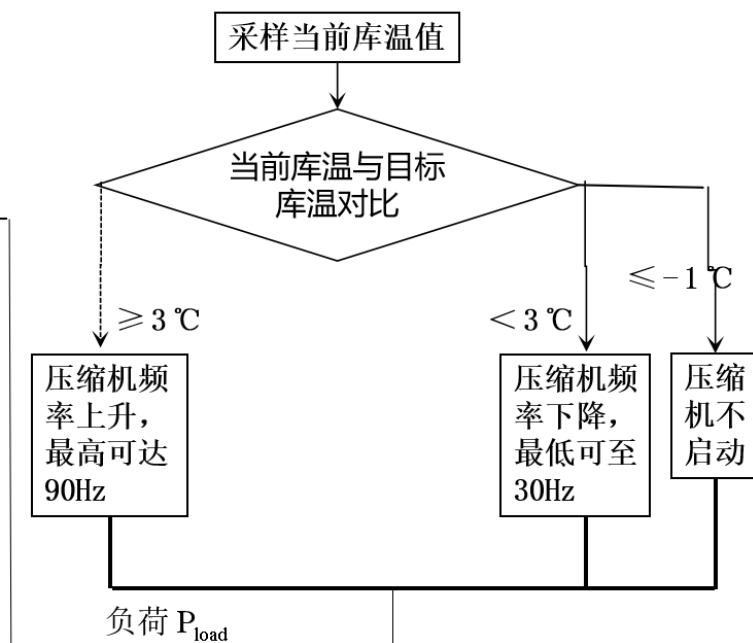
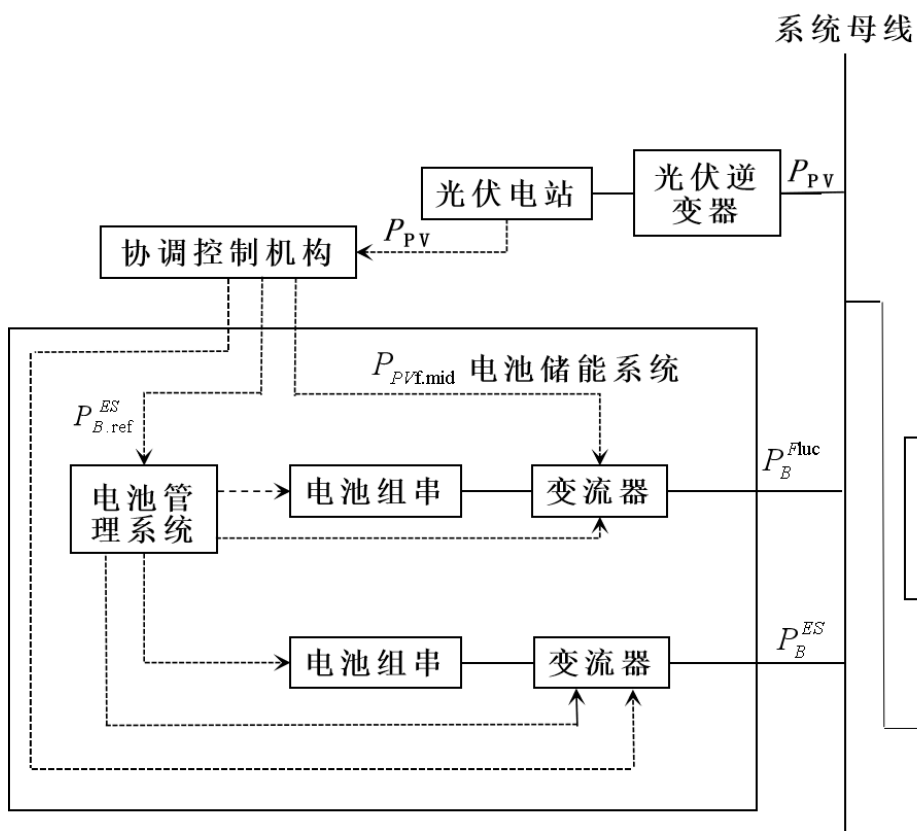
太阳能光伏冷库

- 《新能源的发展前景计划》中,明确了2050年可再生能源将成为能源供应的主体力量,在电力消费中的比重有望达80%。
- 由于新能源动力的不连续性特点,导致我国冷链行业使用新能源的比例很低。
- 《“十四五”冷链物流发展规划的通知》: 优化用能结构, 加强绿色节能设施设备
- 目前传统的是利用冷库屋顶进行光伏发电, 成为被动式太阳能光伏冷库



主动分布式太阳能光伏冷库

前期是开展光伏发电系统、蓄电池储能系统、制冷系统用电系统和冷库库负荷系统之间的耦合分析，基于动力供应的安全性评估，提出冷库负荷与光伏发电系统、蓄电池储能系统、制冷系统之间的匹配。



5. 冷链食品的碳足标识

意义

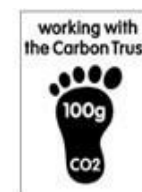
- 碳足迹评价能够衡量产品全生命周期对环境的影响
- 规范企业食品的生产过程，实现可持续发展
- 为可能到来的碳贸易壁垒做好准备

现有标准

- ISO 14044 《环境管理生命周期评价要求与指南》
- PAS 2050 《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》
- ISO 14067 《产品的碳足迹量化》
- 广东省发布的《产品碳足迹 产品种类规则 巴氏杀菌乳》
(DB44/T1874-2016)
- 国家发改委制定的《食品、烟草及酒、饮料和精制茶企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》

不足：

没有结合冷链运输特点
没有供冷方式碳排计算



英国



美国



韩国



加拿大



日本



法国



北美



台湾

碳标签标识说明



中国碳标签



天津商業大學
TIANJIN UNIVERSITY OF COMMERCE

天津市制冷技術重點實驗室
Tianjin Key Lab of Refrigeration Technology



ICFET

工程熱物理基礎及工程國際聯合研究中心
International Centre in Fundamental and Engineering Thermophysics

Go Carbon Neutral

谢 谢

