

碳中和背景下二氧化碳制冷及 超级冷链理论发展研究

北京大学 工学院
张信荣

15801301668/xrzhang@pku.edu.cn

2021.04





PART ONE

- 碳中和背景下的需求
- 天然工质制冷技术
- 农产品超级冷链新机理与技术
- CO₂在碳中和背景下的其它应用





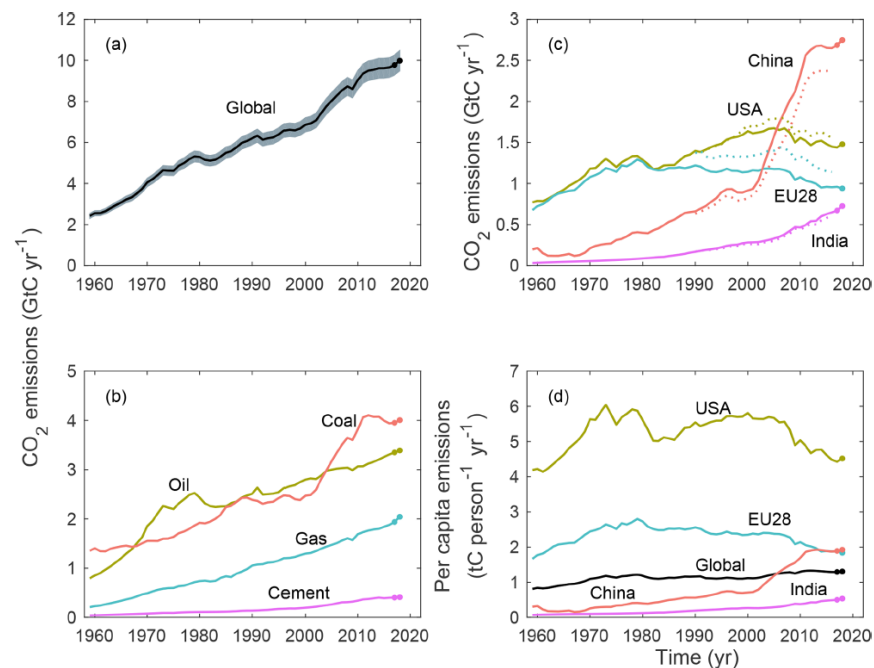
报告目录

- 碳中和背景下的需求





2020年9月22日，习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话。



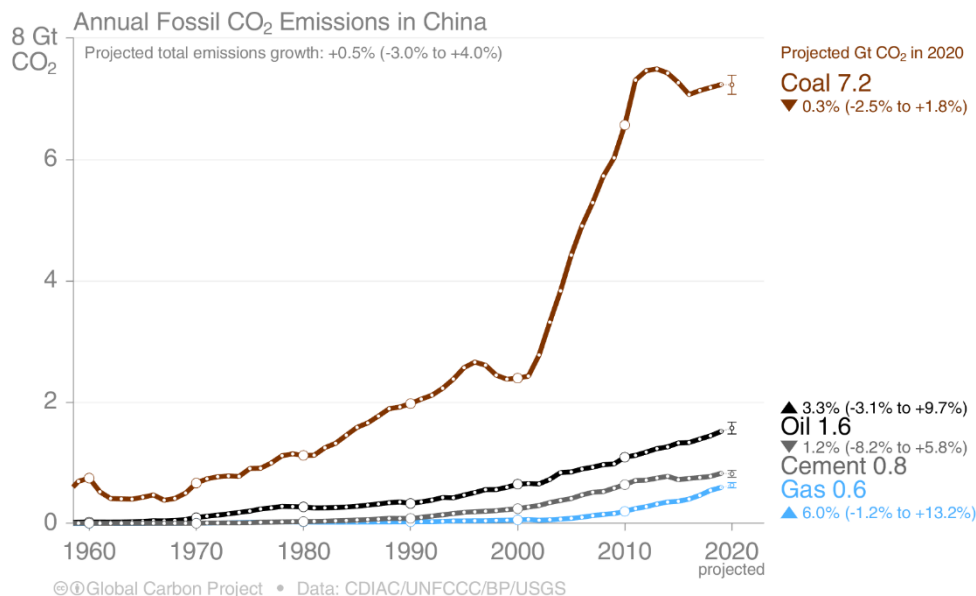
Friedlingstein P, Jones M, O'sullivan M, et al. Global carbon budget 2019[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1783-1838.

- 人类命运共同体
- 绿色发展、生活方式的自我革命
- 2030年CO₂排放达到峰值
- 2060年前实现碳中和



◆ 碳承诺带来的挑战与机遇

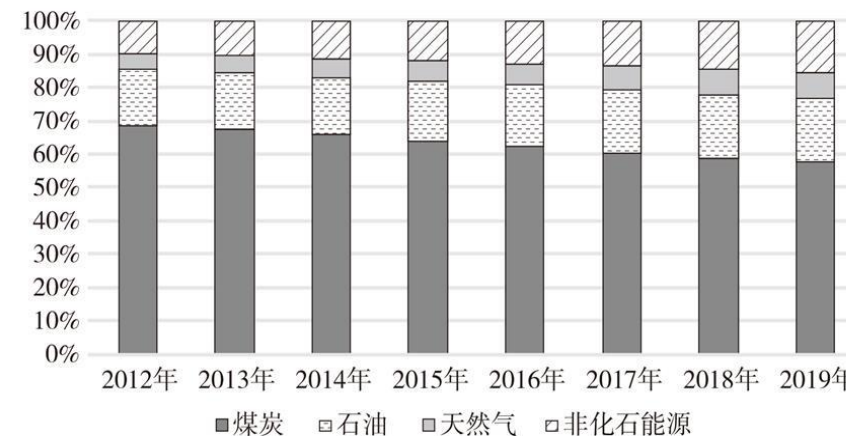
➤ 中国碳排放来源与能耗



□ 中国主要碳排放来自煤，占比大约**72%**

□ 三大化石燃料导致的碳排放占总碳排放的约**93%**

□ 中国能耗来源主要来自煤、石油，水能和天然气提供的能量相当，再次是核能和新能源



农产品冷链物流与加工中

◆ 如何补充、更新、替代？

挑战！！！！

◆ 启发新思路！新技术！开启新时代！！

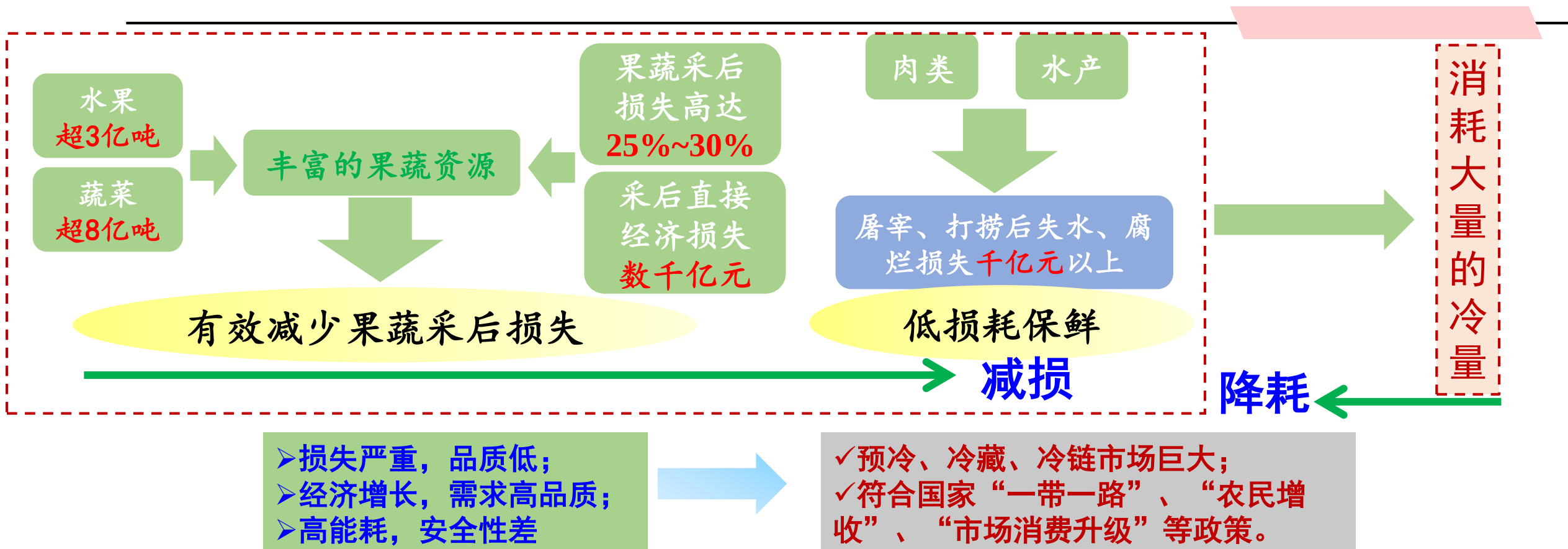
机遇！！！！

- 2020年HCFCs生产配额仍达到30万吨，产能**超过63万吨**；
- 2019年HCFs国内达到**65万吨**以上
- HFOs正迅猛增长
- 《蒙特利尔议定书》要求，包括中国在内的发展中国家，在2024年要冻结HFCs生产

- 2010年空调年产超过**1亿台**；
- 车辆近**3000万台**；
- 家用冰箱大**8000万台**
- 大量工业、商用制冷
- 如果氟利昂用量远超**1亿吨**，其当量的温暖化指数超**1000亿吨**。

巨大缺口

◆ 鲜活农产品采后需求





PART TWO

- 天然工质制冷技术



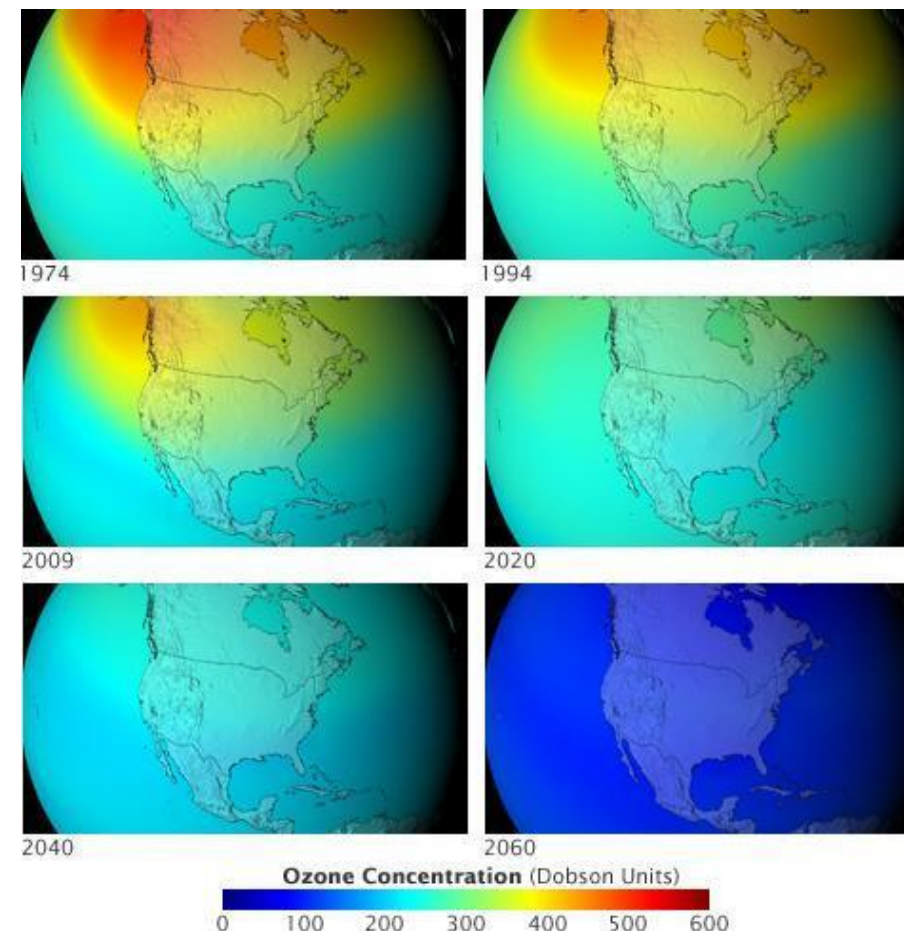
◆CO₂制冷与制热的优越性

生态精灵

制冷剂		ODP	GWP	安全性
		臭氧消耗潜势	全球变暖潜势	
HCFC	R22	0.055	1700	A1
HFC	R134a	0	1300	A1
	R404A	0	3850	A1
	R407C	0	1370	A1
	R410A	0	1370	A1
	R507A	0	3900	A1
天然流体	R717	0	<1	B2
	(氨气)			
	R290	0	3	A3
	(丙烷)			
	R600a	0	3	A3
	(异丁烷)			
	R744	0	1	A1
	CO ₂			

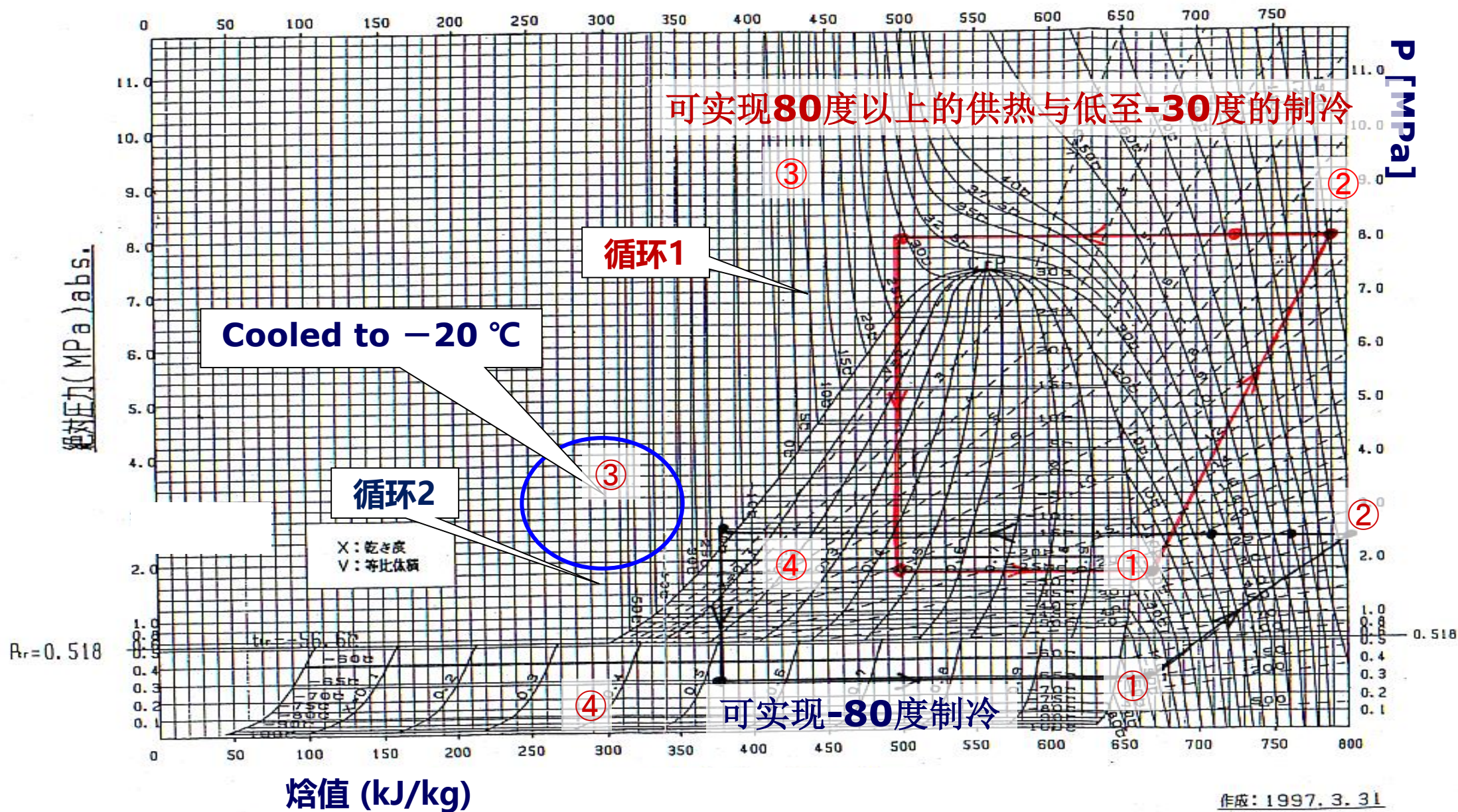
※) 安全性标识：A：低毒性，B：高毒性
1：不易燃，2：低易燃，3：高易燃

传统工质/制冷剂与CO₂对比

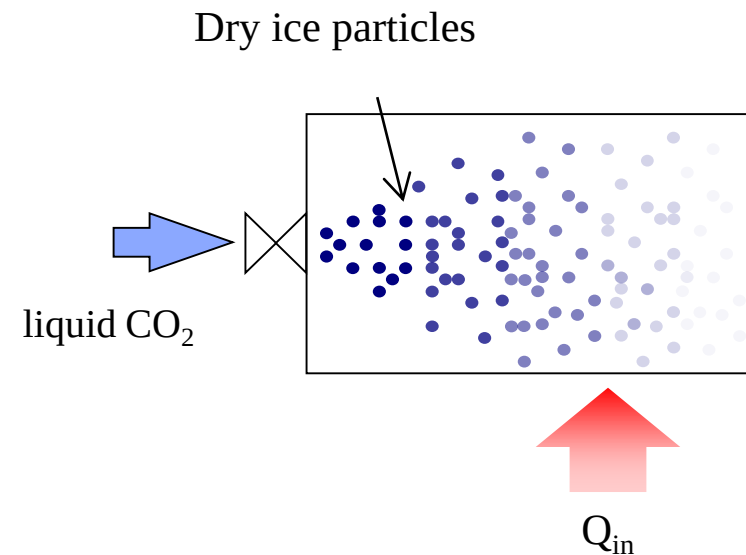
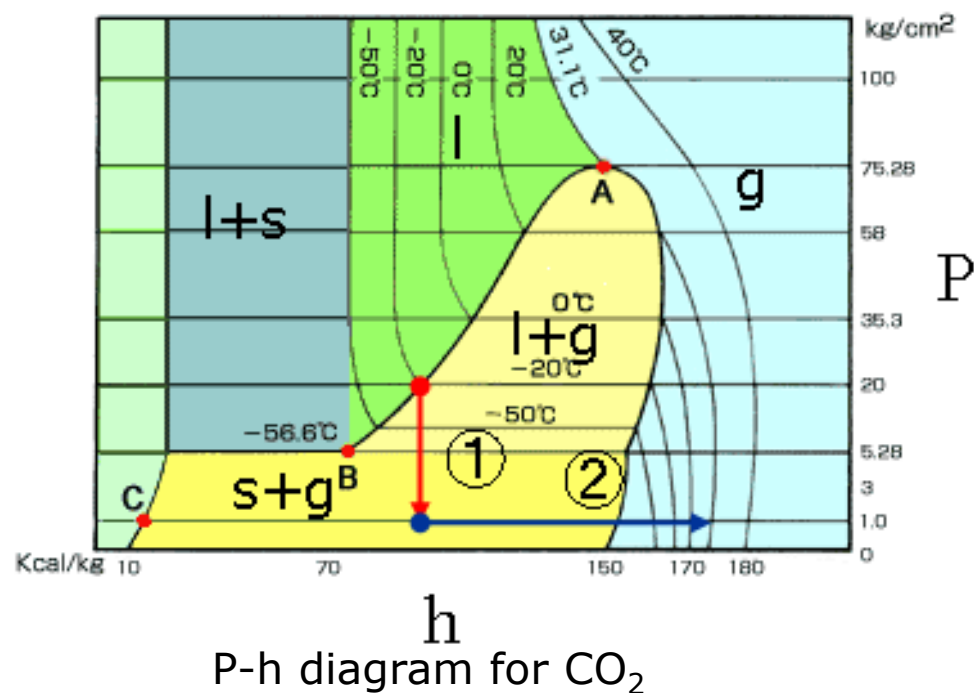


NASA预测图：如果未禁止使用CFC时，平流层臭氧的浓度。

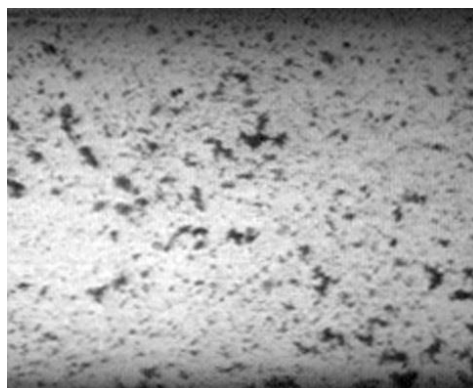
◆ 高效跨临界CO₂制冷与制热热力学循环



◆ 具有固相制冷剂的新型蒸气压缩循环

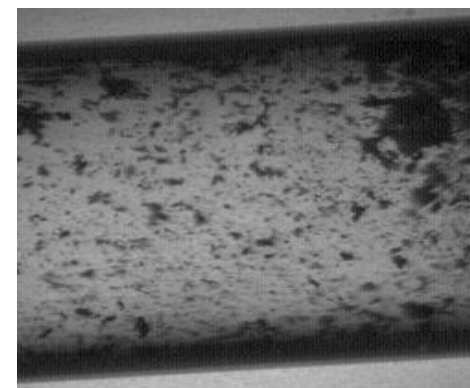


可超低温制冷至 -80°C !

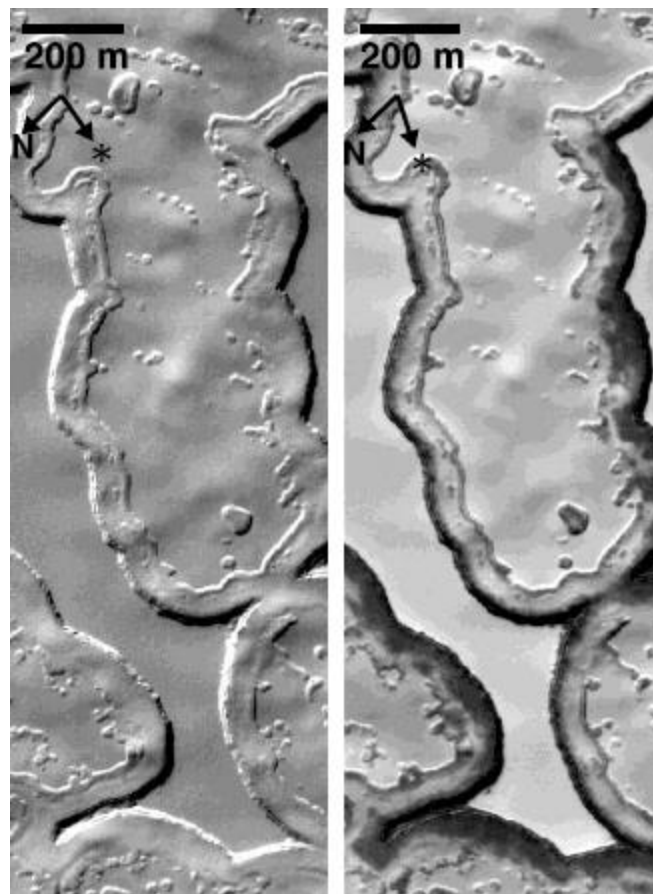


←快速流-2.50m/s

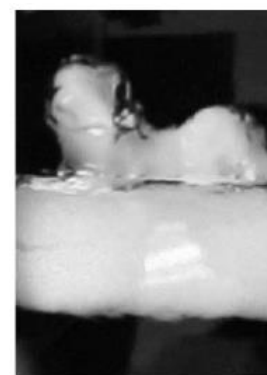
慢速流-0.78m/s →



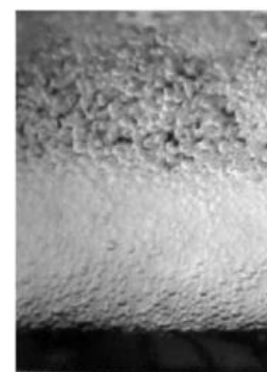
◆ 使用干冰固气多相流作制冷剂



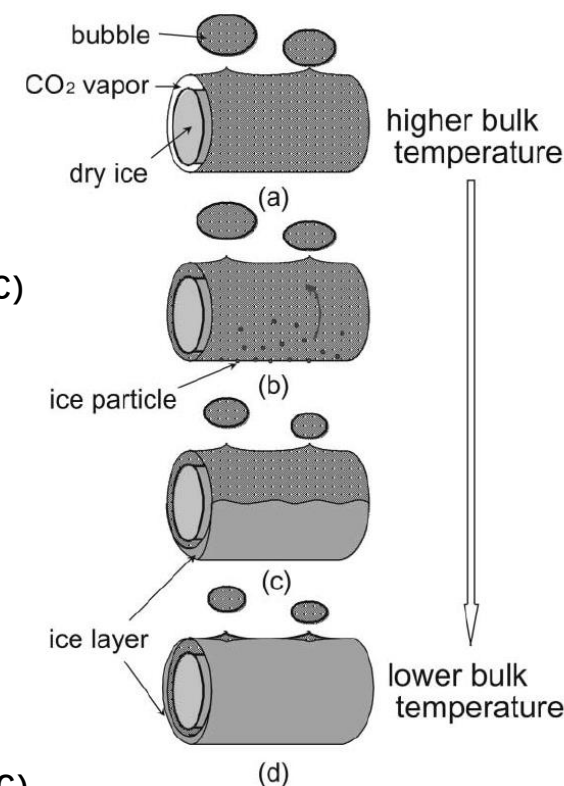
在去除暂时性的干冰覆盖并露出永久性的干冰覆盖层后，反照率的变化图。
Source: Science, Vol 299, 2003, pp.1052.



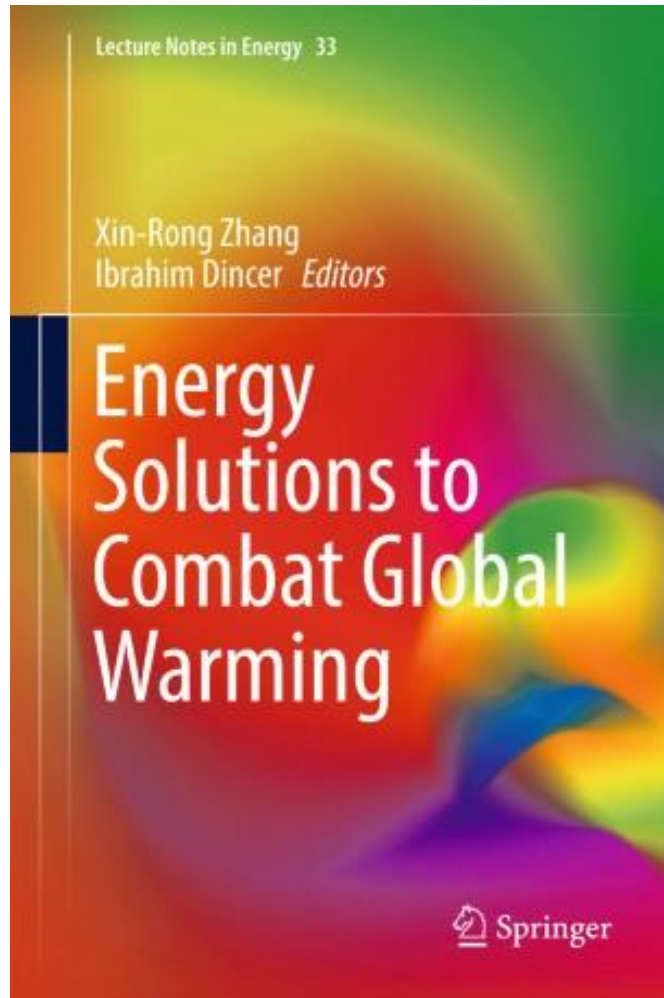
(薄膜状升华)
(Water of 25 °C)



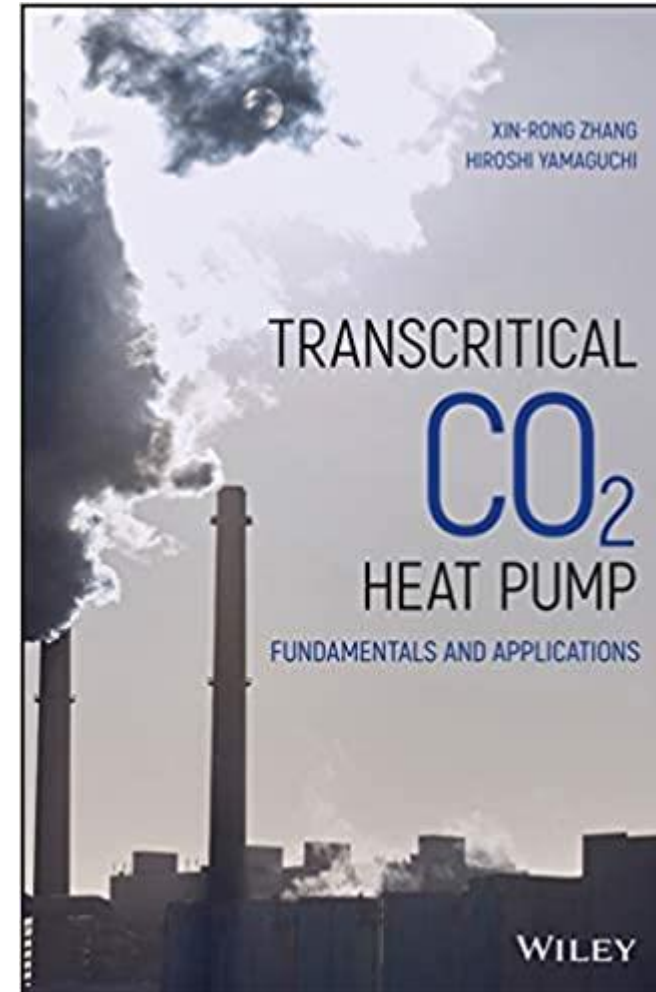
(成核状升华)
(Ethanol of 25 °C)



液体中干冰的升华状况
Source: Int. J. Refrigeration,
Vol 25, 2002, pp.237.



2016.08



2021.02



PART TWO

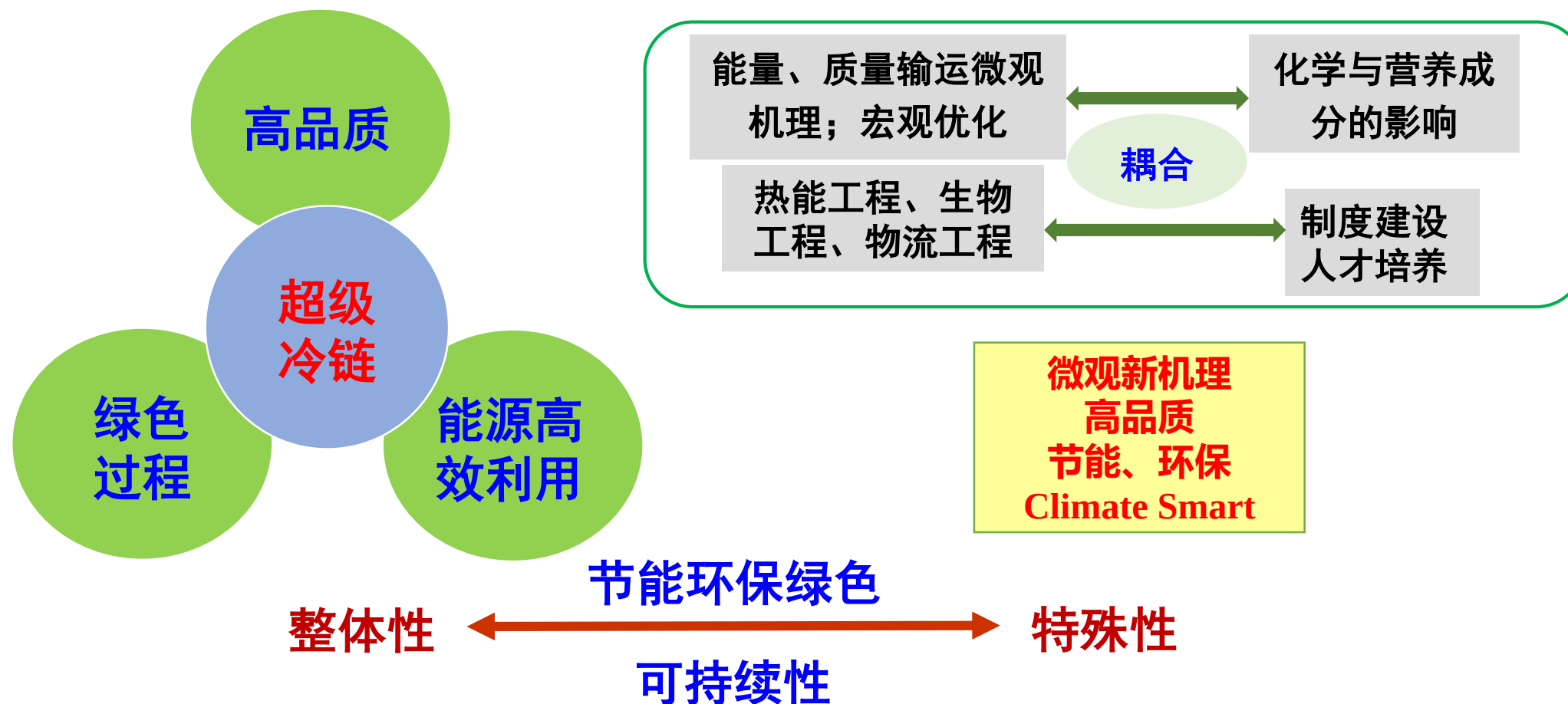


● 农产品超级冷链新机理与技术

- ◆ 超级冷链技术简介
- ◆ 微观机理研究
- ◆ 宏观非平衡态能质输运机理研究
- ◆ 宏观评估与优化方法研究
- ◆ 宏观优化新工艺



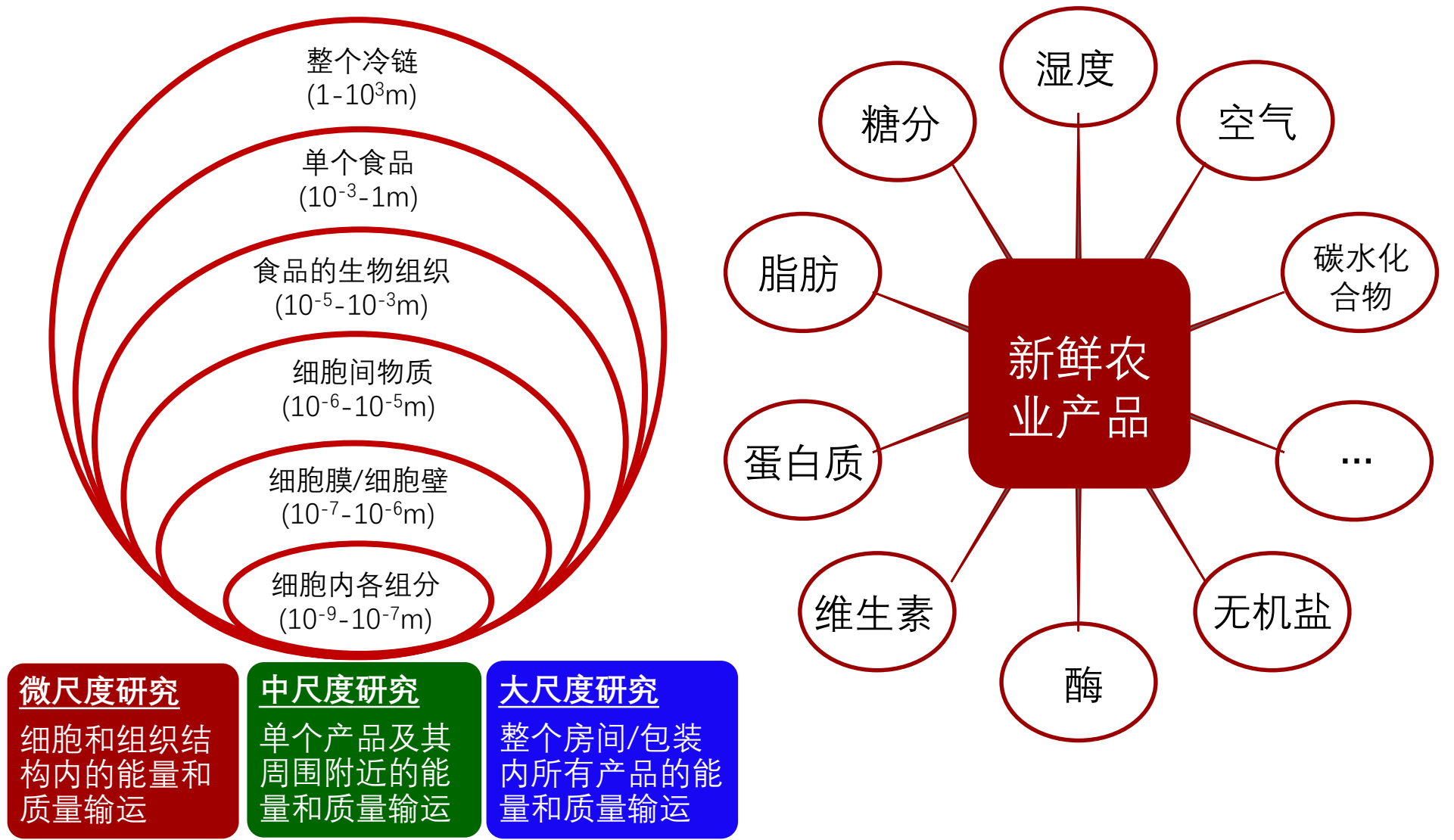
◆ 超级冷链技术简介



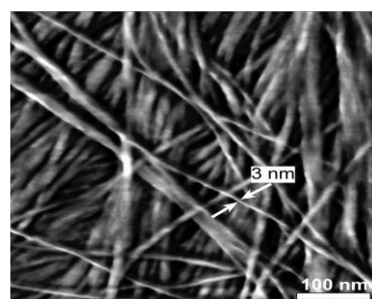
基于能质输运、品质、健康、多学科、制度人才培养耦合关系，**整体系统**研发冷链贮藏物流技术体系与装备



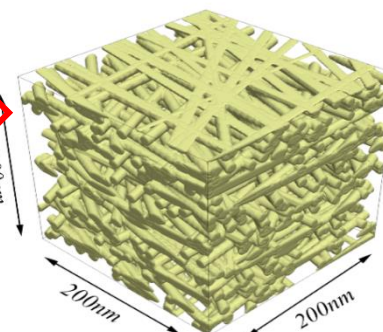
多尺度、多组分、多角度对冷链物流进行研究



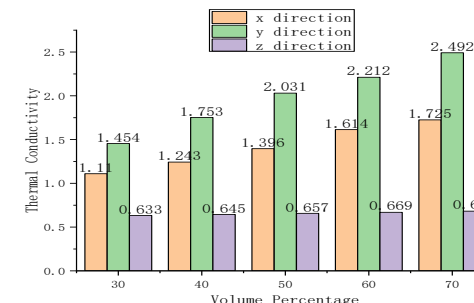
◆ 微观机理研究



多孔
介质
重构

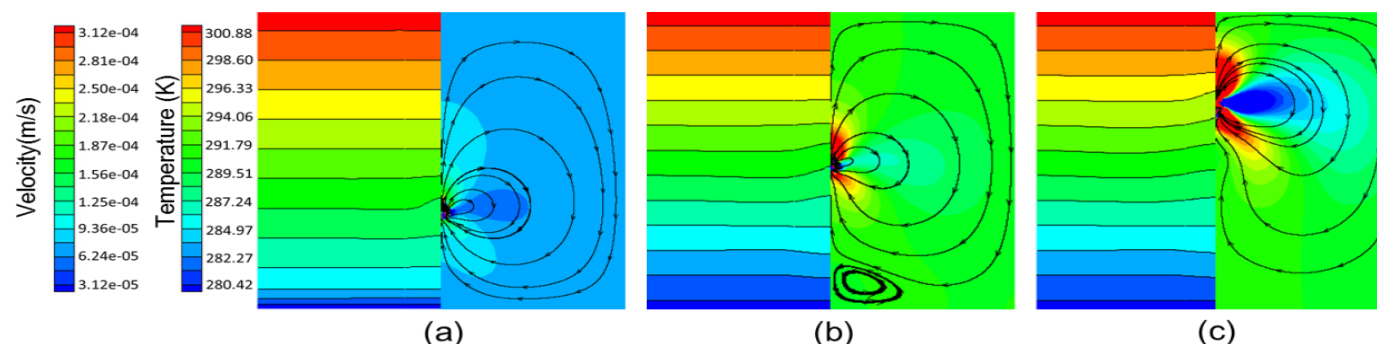


多孔各向
异性三维
热导率



✓不同孔隙率多
孔细胞壁热导率
各向异性特征

发展算法重构微观结构

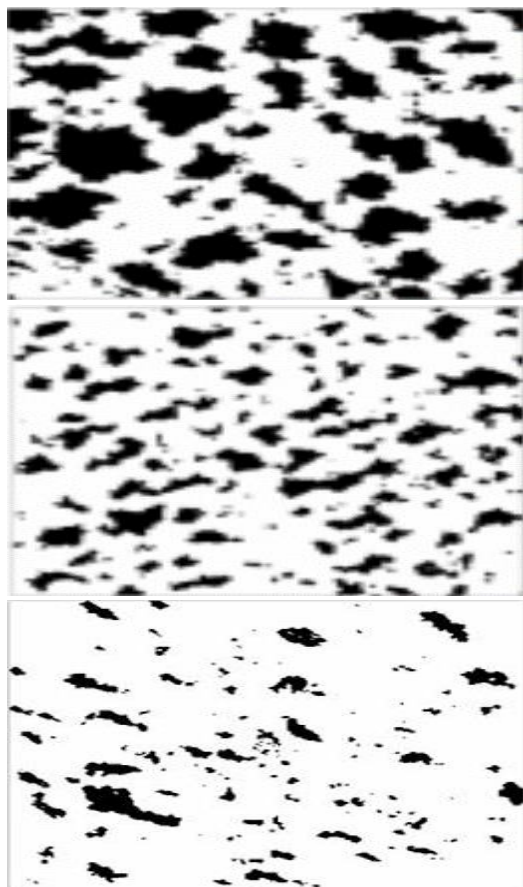


发现果蔬中Marangoni效应及与品质的关联机理

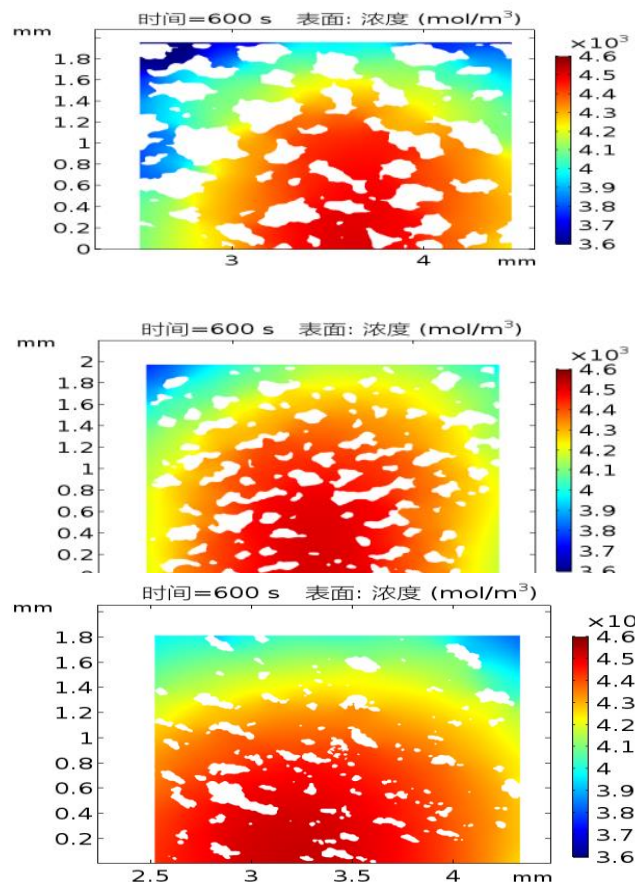
- ✓ 果蔬预冷过程中Marangoni效应可以减弱呼吸作用
- ✓ 温度和气体成分的协同控制可大大提高保鲜效果；
- ✓ 不同品类、不同组织的果蔬，应该采取不同的调控策略

组织预冷过程降温与失水速率耦合作用新机理

X-ray CT

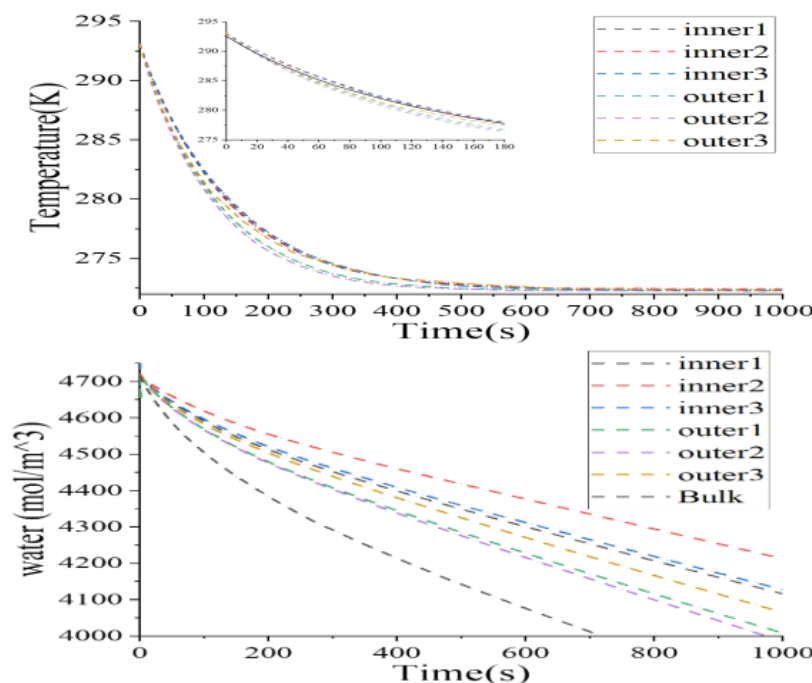


含水量分布云图

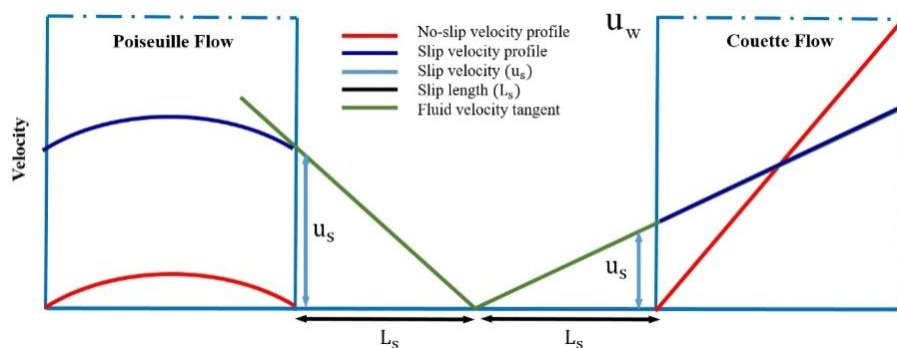
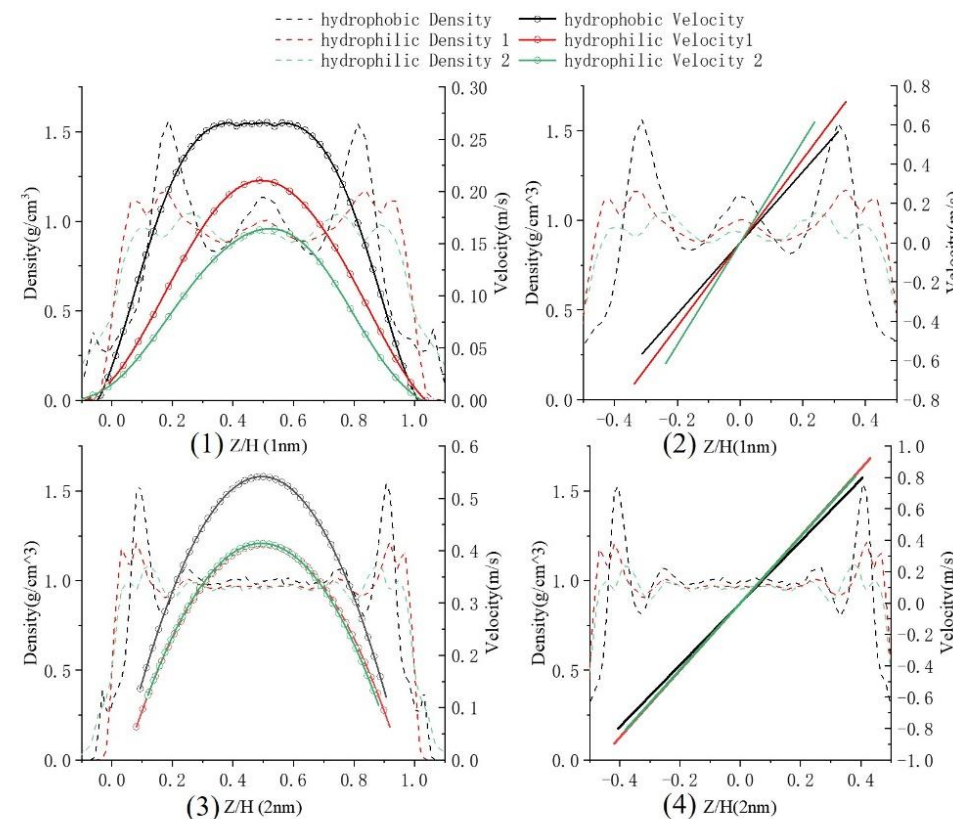
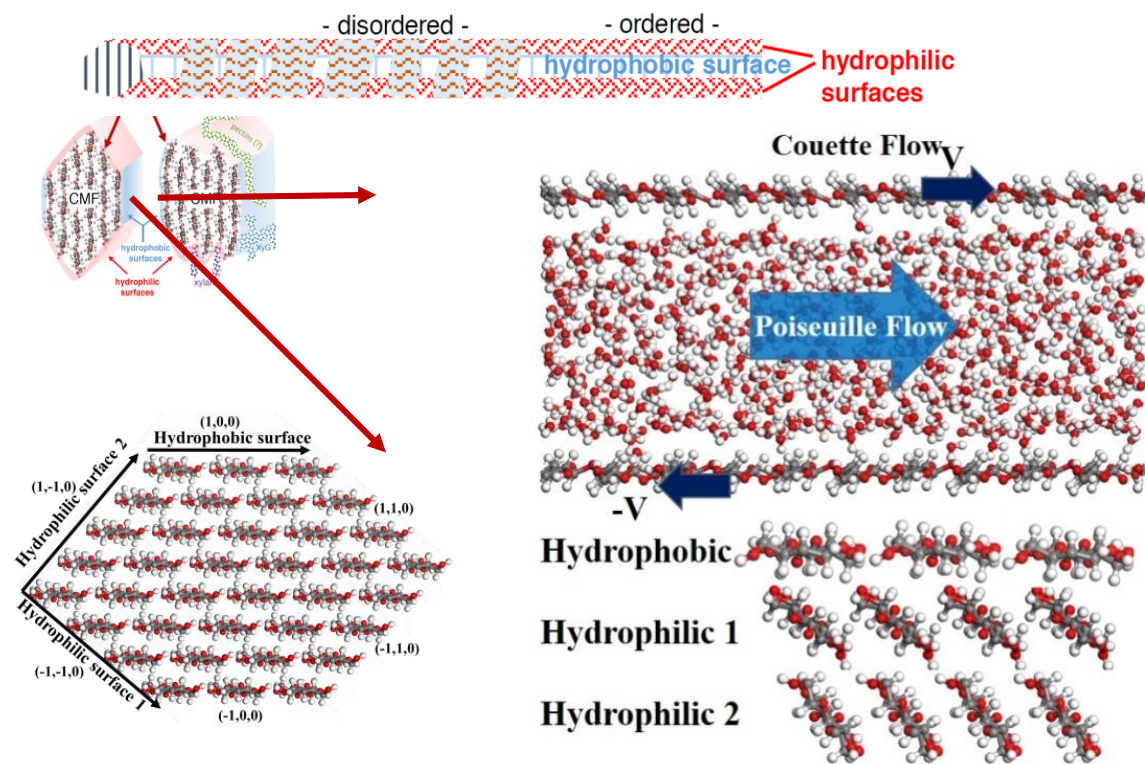


✓ 孔隙大小、形状、分布及预冷温度对失水速率影响规律

温度与含水量变化曲线

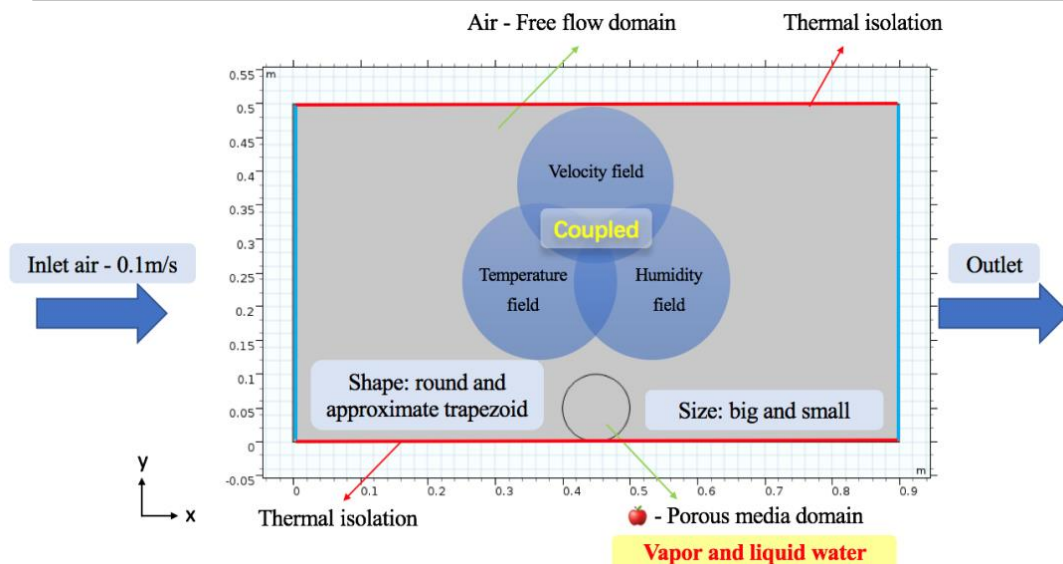


纤维素多孔介质中水流动滑移机制



- ✓ 明确不同壁面流动中的滑移规律
- ✓ 3nm以下狭缝中尤为明显

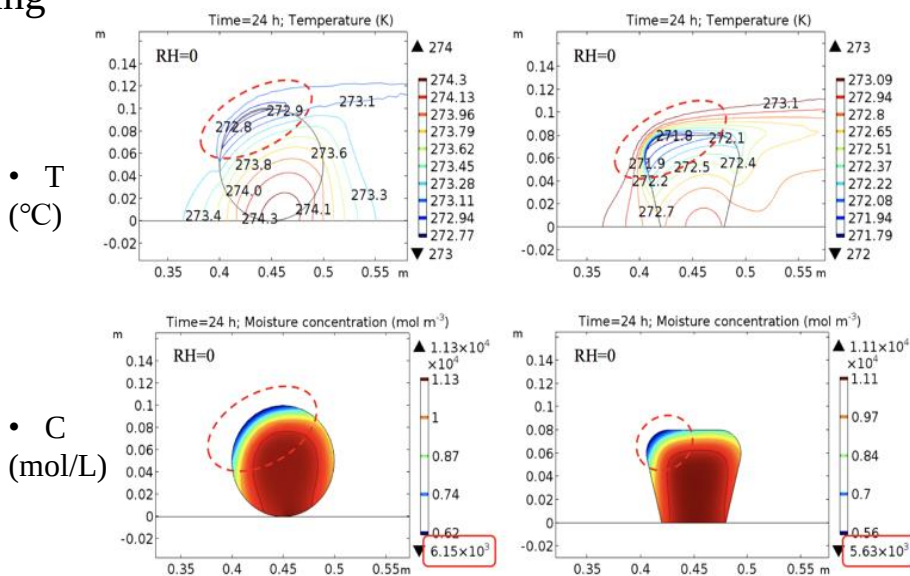
采后水果多孔、多相新模型及其预冷、复温过程热质耦合输运新机理



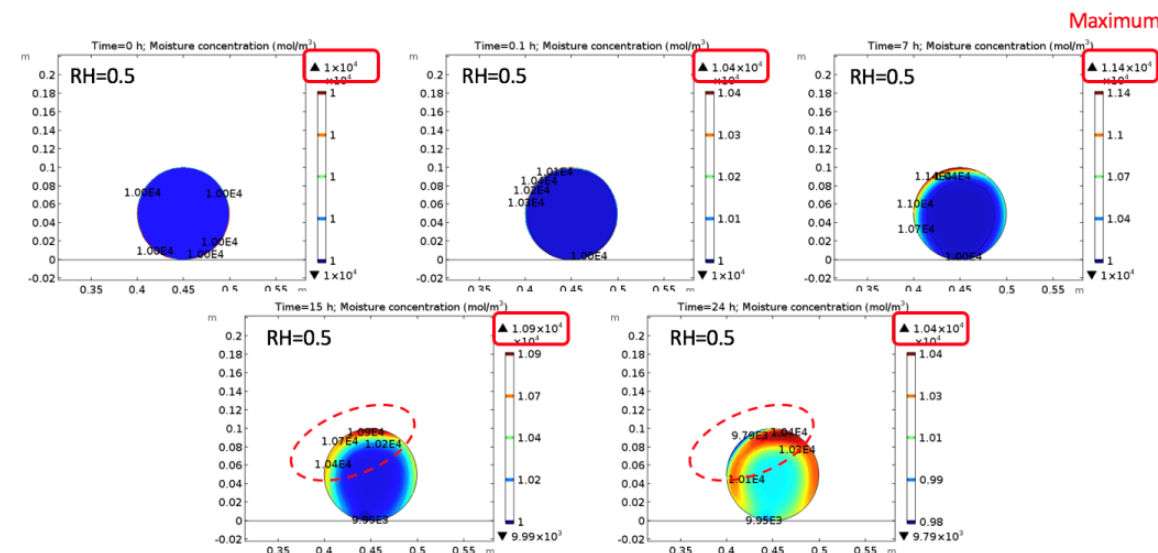
- ✓建立果实生物多孔、多相、内热源特征的新模型;
- ✓阐明水果的质变与热量和质量传递耦合作用机制

果实形状、迎/背风面差异对导致冷害、水分蒸发（冷凝）有着重要作用

• Precooling

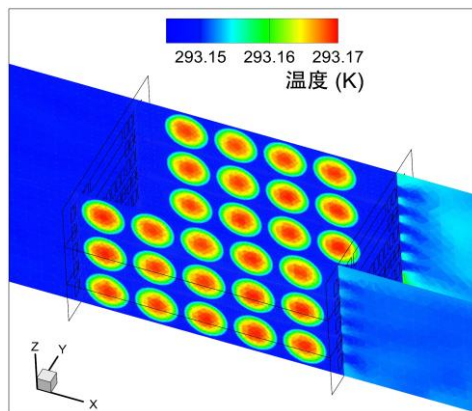


• Rewarming

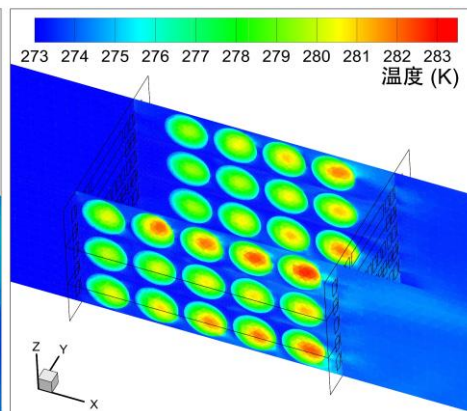


能量输运特性

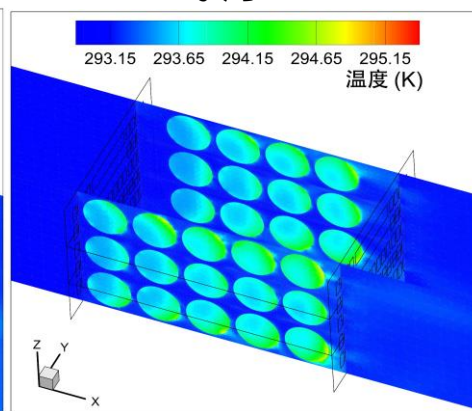
初始稳态



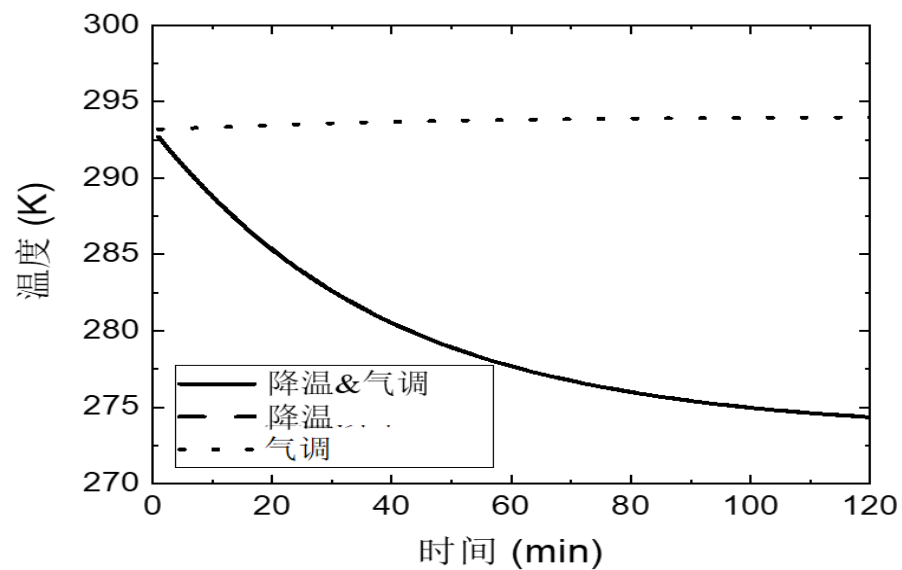
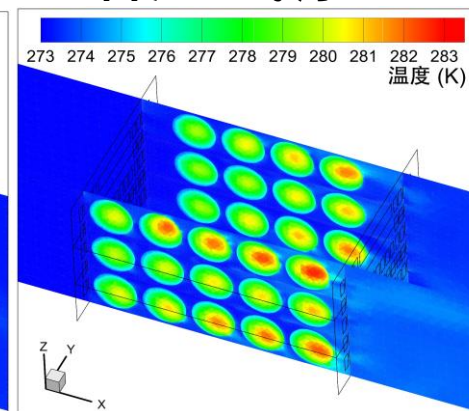
降温1 h



气调1 h



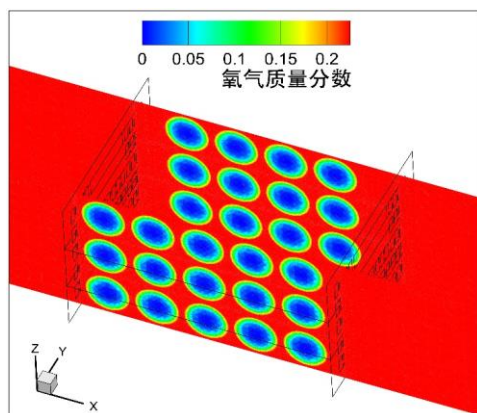
降温&气调1 h



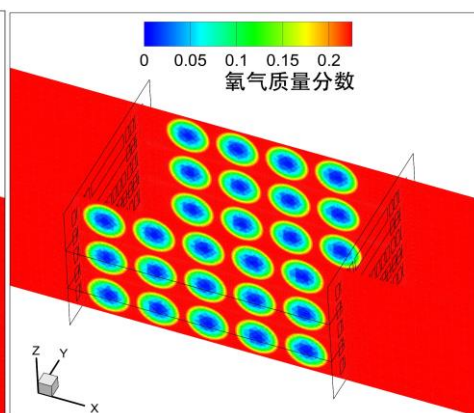
- 降温使果实内体积平均温度在2 h内降至风温。
- 下游上层和下层的果实局部温度偏高。
- 气调对果实温度无显著影响。

质量输运特性

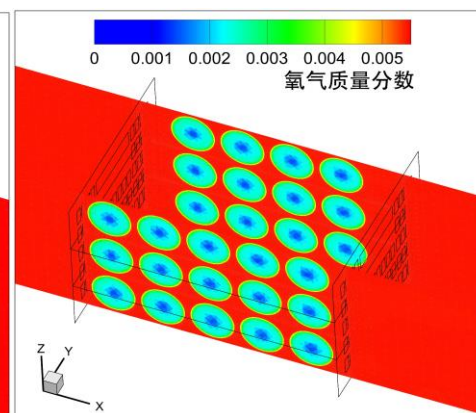
初始稳态



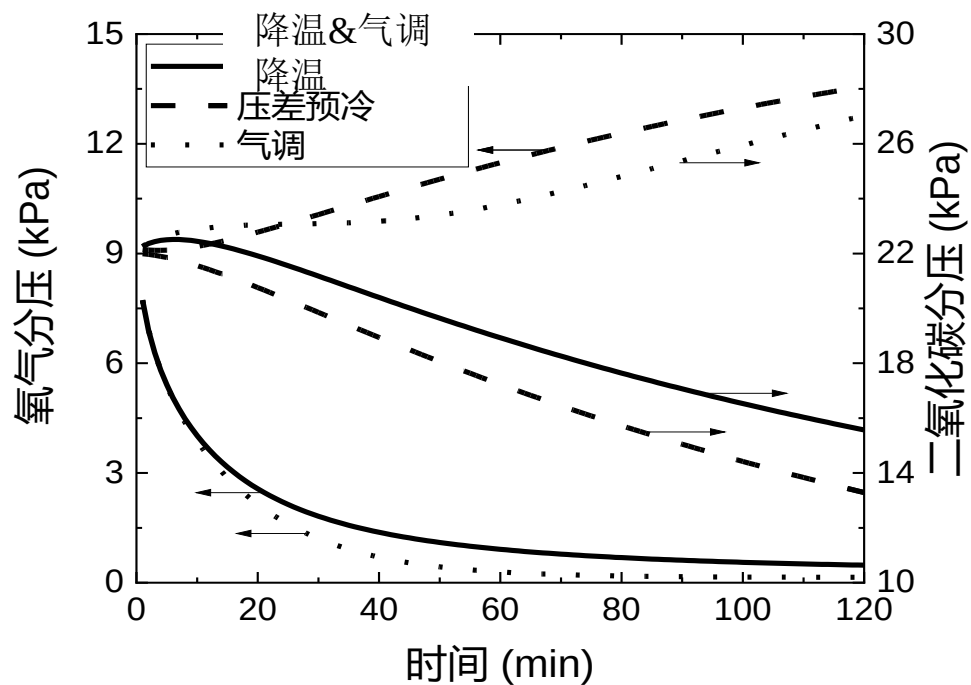
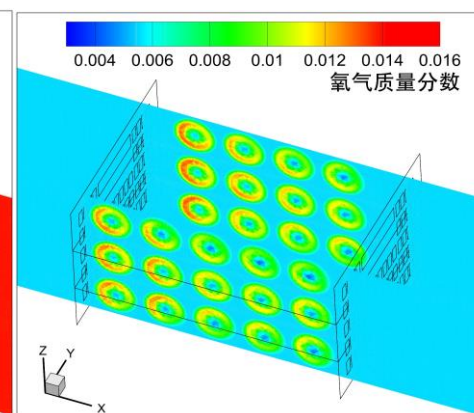
降温1 h



气调1 h

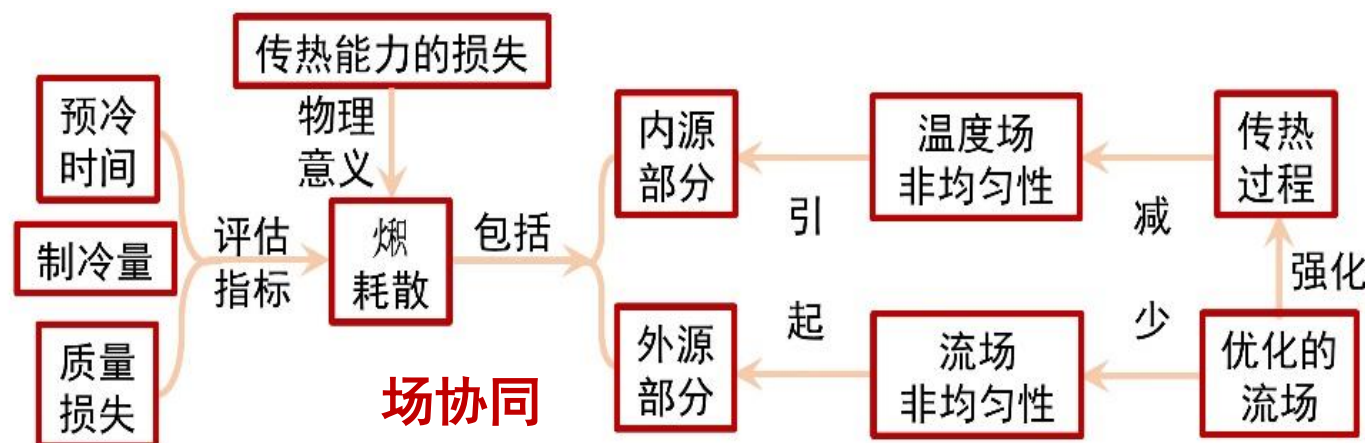


降温&气调1 h

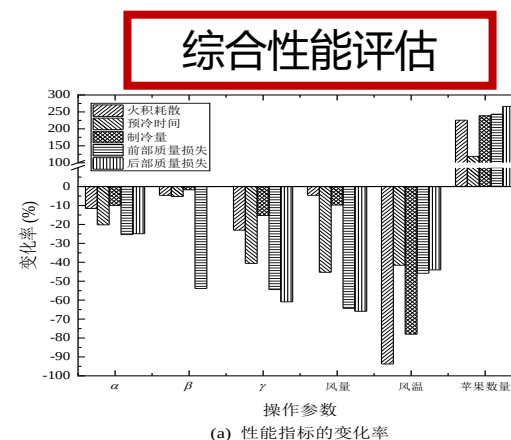
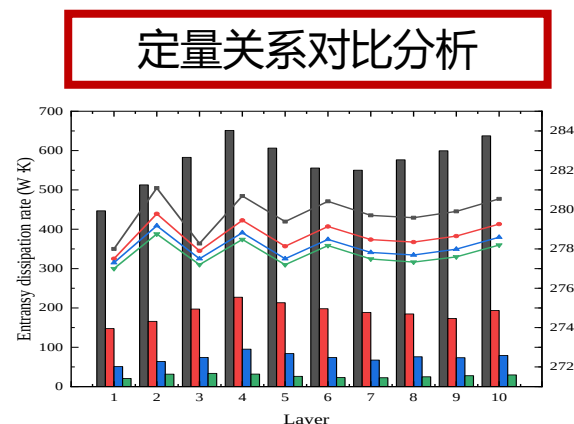
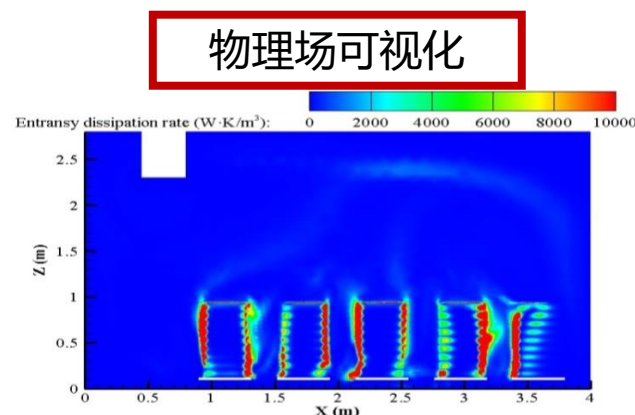


- 气调可使果实内的氧气含量降低，而仅降温时果实内的氧气含量升高。
- 降温可使果实内的二氧化碳含量降低，而仅气调时果实内的二氧化碳含量升高。
- 同时降温和气调使果实内的氧气聚集在一环状区域内，在上游局部温度较低的果实内更显著。

◆宏观评估与优化方法研究



- ✓ 新方法通风能耗比压差预冷降低60%
- ✓ 新方法7/8预冷时间比冷库预冷减少12%
- ✓ 新方法温度非均匀性比冷库预冷降低10%



发明专利：张信荣等，一种通过数值模拟的食品预冷性能评估和优化方法-201910384615.1

采后果蔬蓄冷传热性能评估和优化的热力学机理和方法

◆宏观优化新工艺

空气扰流高效空气预冷新工艺

冷库预冷



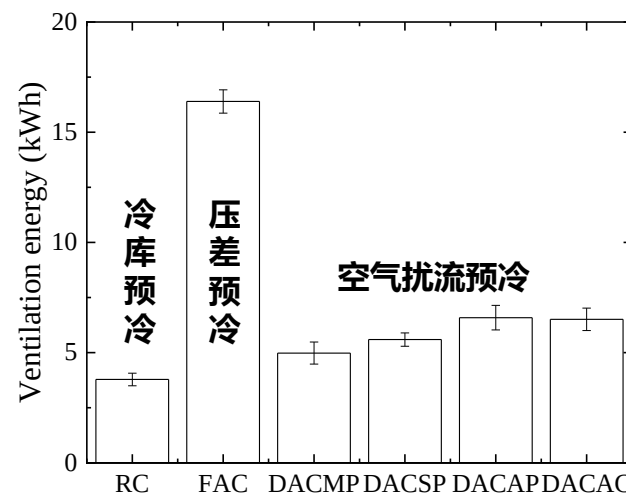
压差预冷



场协同

优化

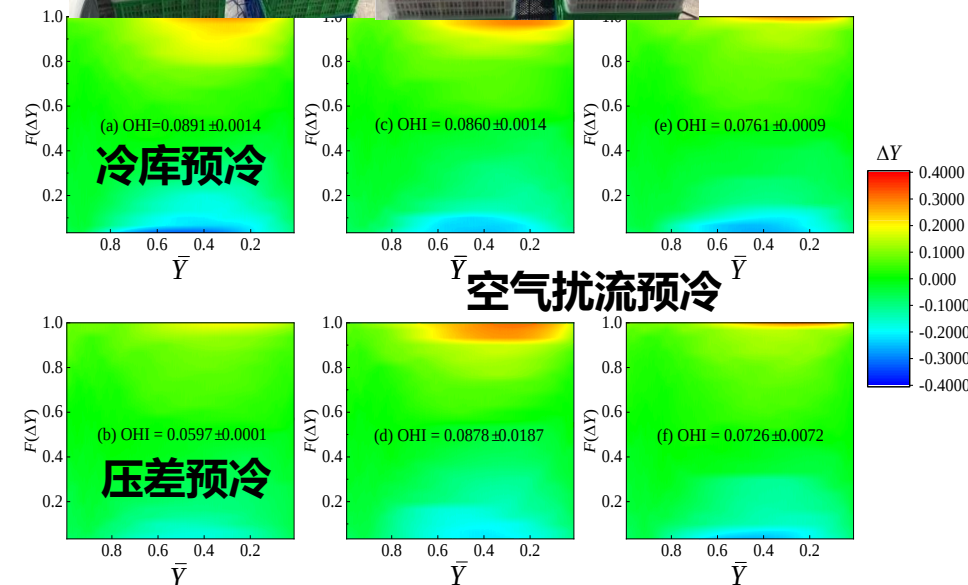
空气扰流预冷



Air-based precooling methods

✓通风能耗比压差预冷降低60%

✓总能耗降低20~30%以上



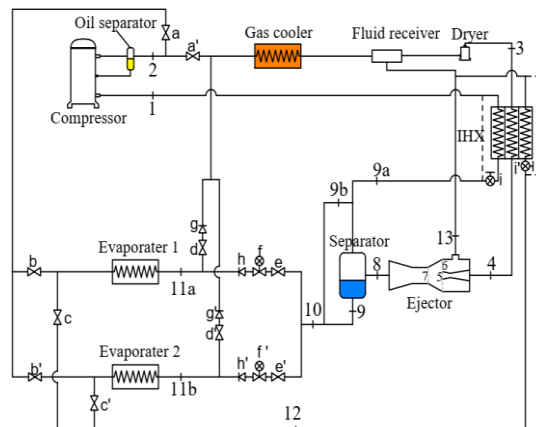
✓温度非均匀性比冷库预冷降低10%以上

新型双组蒸发器带喷射器的跨临界CO₂制冷循环

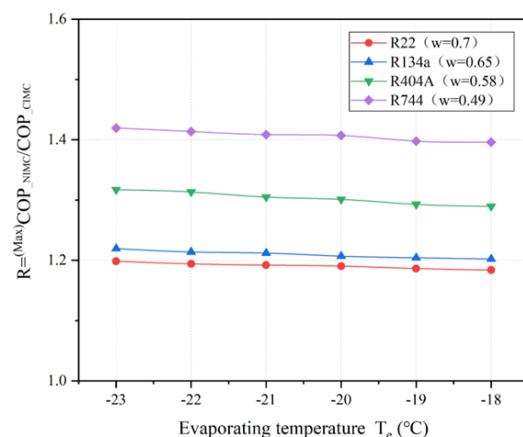
大温差
快速冷冻

- ✓ 品质
- ✓ 时间
- ✓ 能耗
- ✓ 效率
- ✓ 经济性
- ✓ 可持续性

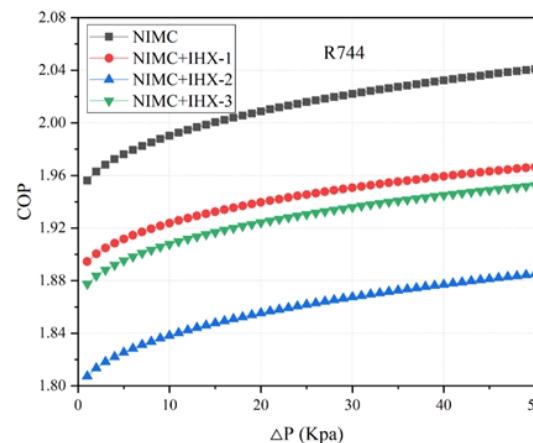
影响冷
冻加工
产业



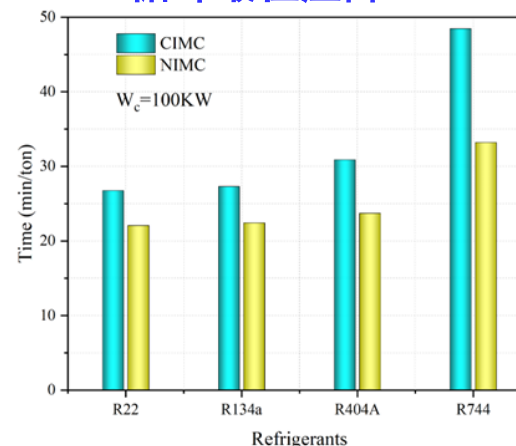
新型制冷循环图



新型循环制冷能效对比图



循环最佳压降



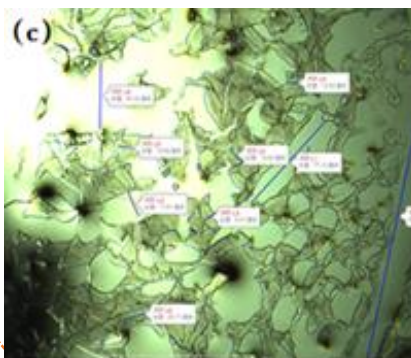
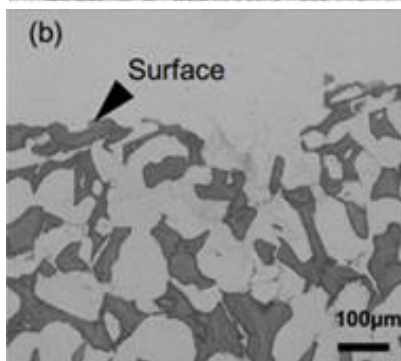
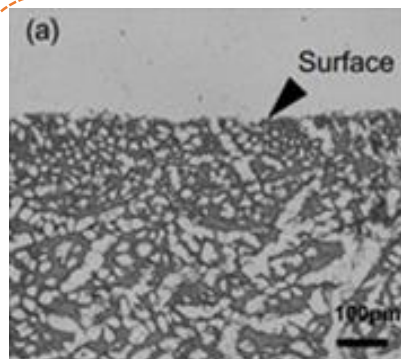
和传统循环制冷时间对比

相同制冷量的情况下

- ✓ 制冷时间最大约
- ✓ 缩短31%左右
- ✓ 制冷能效比能
- 提高5%~10%

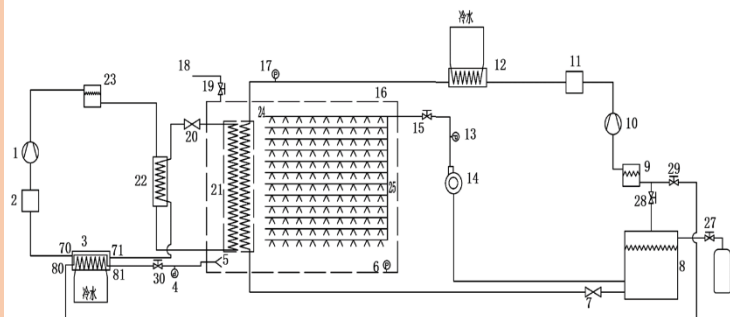
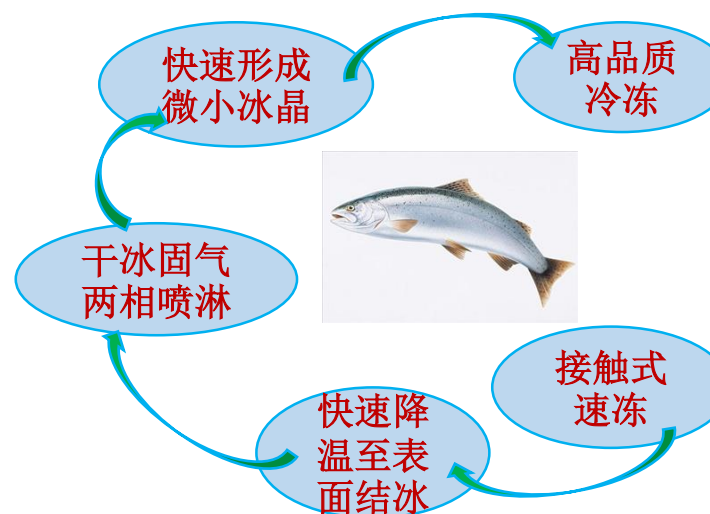
为大规模水产品节能、环保、高品质的冷冻加工与冷链物流提供技术支撑

新型混合冷冻加工系统及方法



不同冷冻温度与
风速下冰晶: (a) -
35° C, 15m/s;
(b) -25° C,
0m/s;
(c) -15° C, 0m/s

**高速降温冷
冻，避免蛋
白质被生长
冰晶破坏，
硬度、脂质
等质构更好**



新型水产混合冷冻加工系统及方法

- ✓ 降温越快，冰晶越细小、越均匀
- ✓ 快速通过最大冰晶形成带，硬度、蛋白质等品质具有显著提升

新工艺与方法实现低耗、高效快速水产冷冻加工



北京市城市热管理工程技术研究中心



城市（区域）热管理是当今国际新兴前沿的研究领域。它从城市/区域整体的角度，系统地研究**冷热与区域能源供应、冷热与资源循环高效利用、冷热量转换与利用、热与环境**等关键科学与技术问题，以起到促进节能减排、低碳、环保等作用，实现可持续发展。

中心在以往长期的冷热能源转换利用和热管理的技術研究中，积累了深厚的低品质热量有效利用技术，长期围绕**高品质农产品深加工、天然工质冷热一体化、果蔬冷链物流保鲜、太阳能利用、蓄热、热管理集成**等关键技术，形成了具有自己特色的技术积累。在产业化方面，**低温干燥、压差预冷、功能性食品、无氟CO₂商/民用冷热一体化机组、冰浆预冷、废热回收**再利用工艺与装备技术等科研成果都已经实现了产业化应用，取得了良好的经济效益。



中国制冷学会科学技术奖

获奖证书

为表彰在全国制冷科技领域进行科技
研究、技术开发、成果推广、应用等方面
做出突出贡献的科技工作者，特发此证。

获奖名称：中国制冷学会科学技术进步奖

获奖项目：果蔬冷链设备和技术研究及应用

获奖等级：一等奖

获 奖 者：张信荣

所在单位：北京大学



证书编号：J2017-1-1-R02

中国制冷学会科学技术进步奖一等奖

Thanks for your attention!



问题可联系: 15801301668

