

天津商业大学

TIANJIN UNIVERSITY OF COMMERCE

《环境条件对人造雪的影响》

天津商业大学

刘斌 教授





1.研究背景

2.人造雪能质传递特性

3.人造雪不同环境研究

4.结论





雪的应用



滑雪旅游



增加土壤
养分



雪崩预测



促进农作
物生长



污水处理



除尘





问题的提出

01

对于人工制雪过程中环境因素的影响研究较少，特别是关于环境温度、相对湿度与造雪水滴临界直径之间的关系。

02

造雪机普遍用水温度在 5°C 以下，但并没有相关文献对其原理进行研究分析，环境温湿度与气液混合比对雪密度的影响也缺乏相关研究

03

水滴从喷嘴喷出的蒸发冷却到冻结的过程，及影响冻结时间的因素研究较少





人造雪的基本原理

质量传递

$$\frac{dm}{dt} = h_m A M_w (C_v - C_s)$$

$$sh = \frac{h_m D}{D_c} = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} S_c^{\frac{1}{3}}$$

舍伍德数

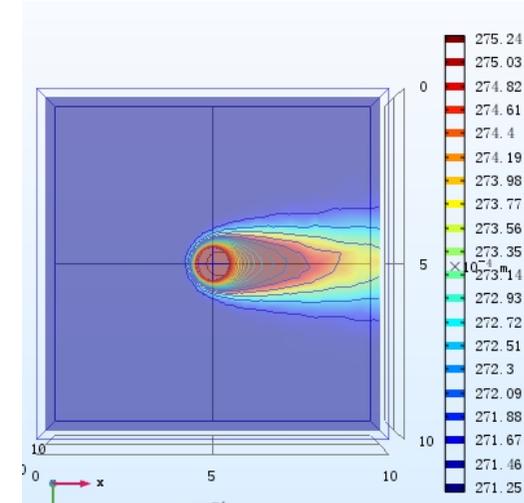
热量传递

$$Q_s = hA(T_a - T_w) \quad h = \frac{\lambda Nu}{D}$$

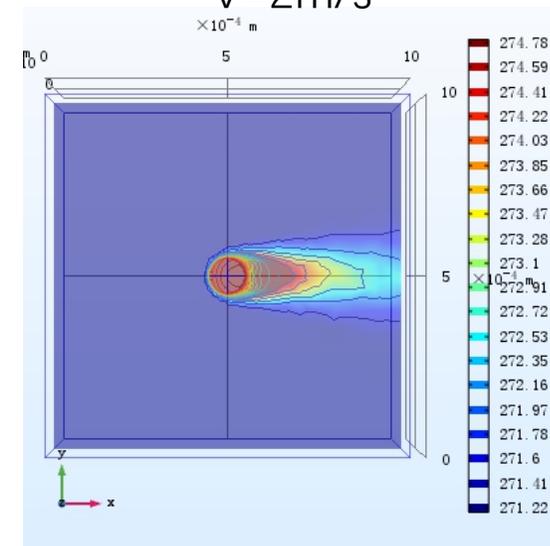
$$Nu = (2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}})$$

$$Q_e = dm * L$$

$$\left(\frac{4c_w D_c sh M_w (C_v - C_s)}{6} t + D_0^2 \right) \frac{dT_w}{dt} = \lambda Nu (T_a - T_w) + r_L D_c sh M_w (C_v - C_s)$$



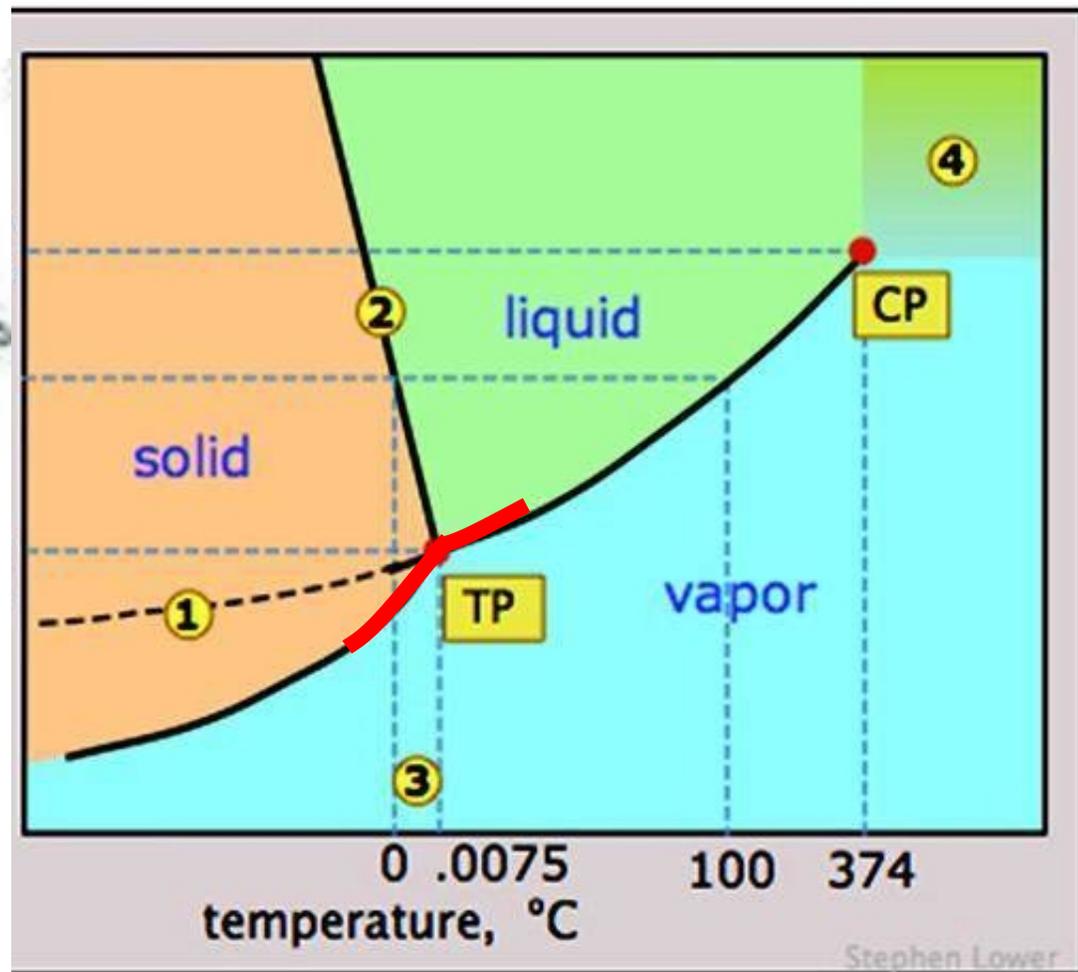
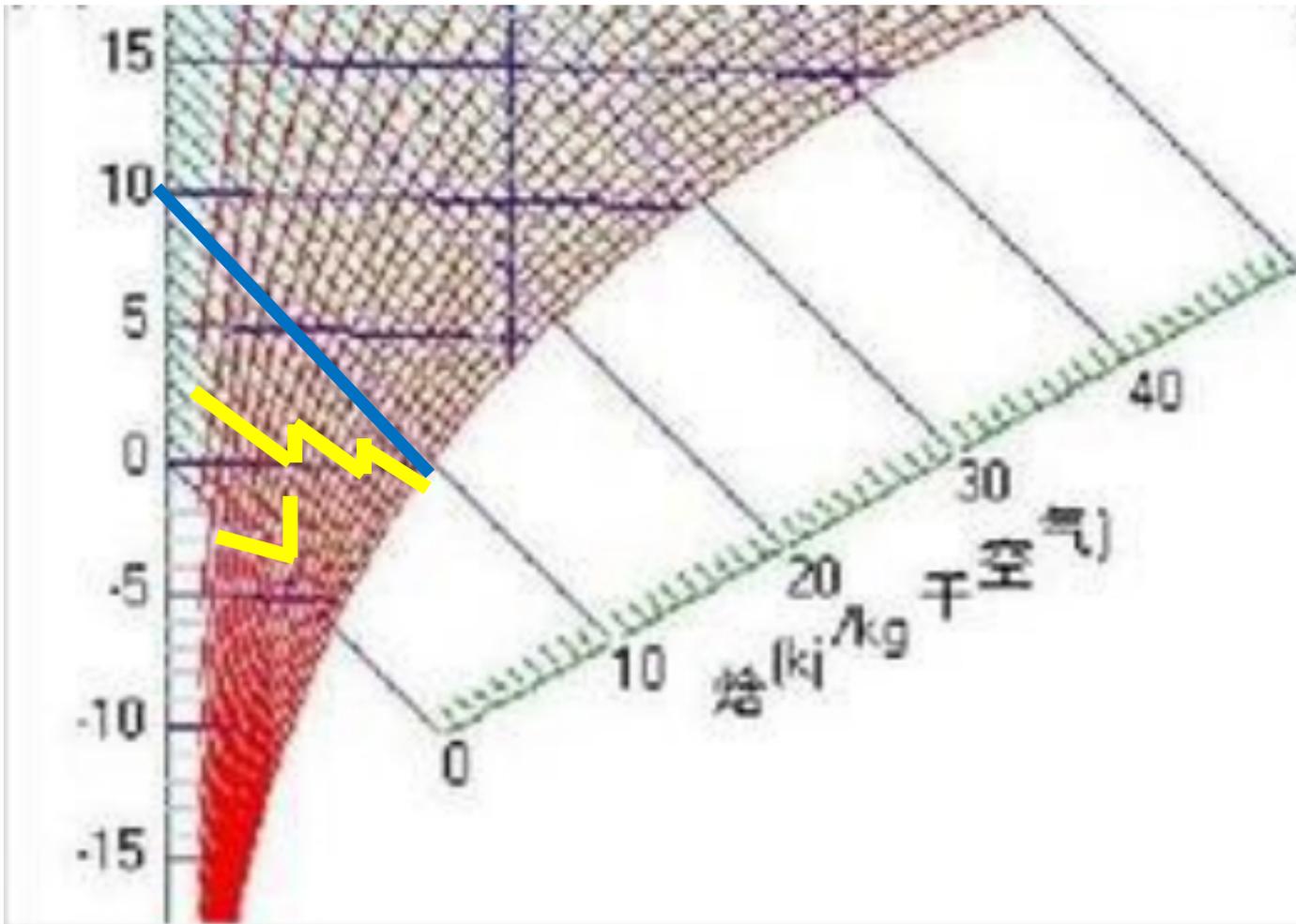
v=2m/s



v=6m/s



人造雪的基本原理

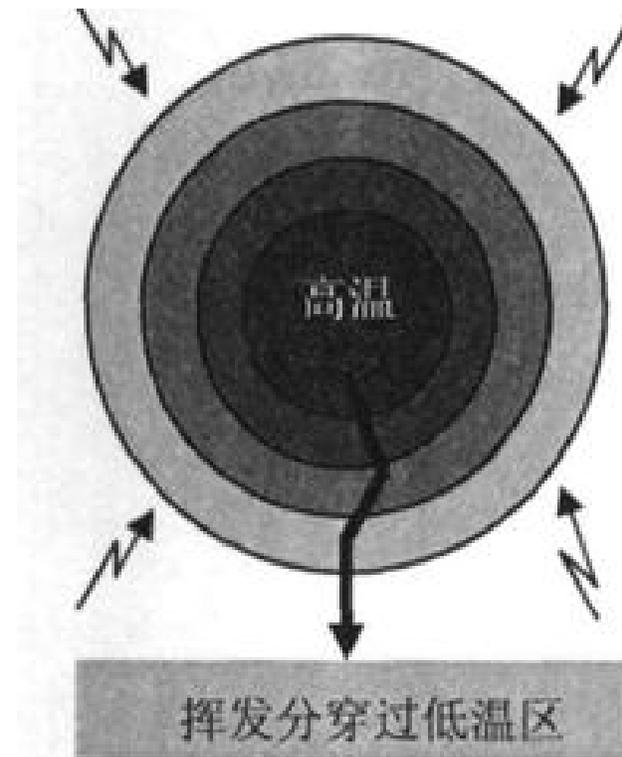
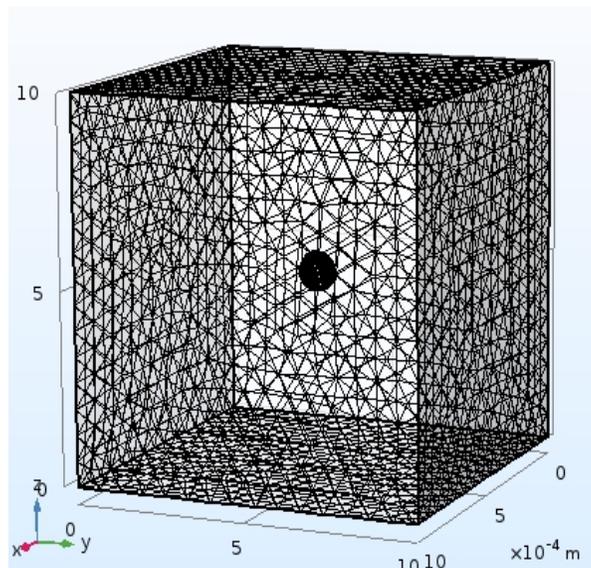
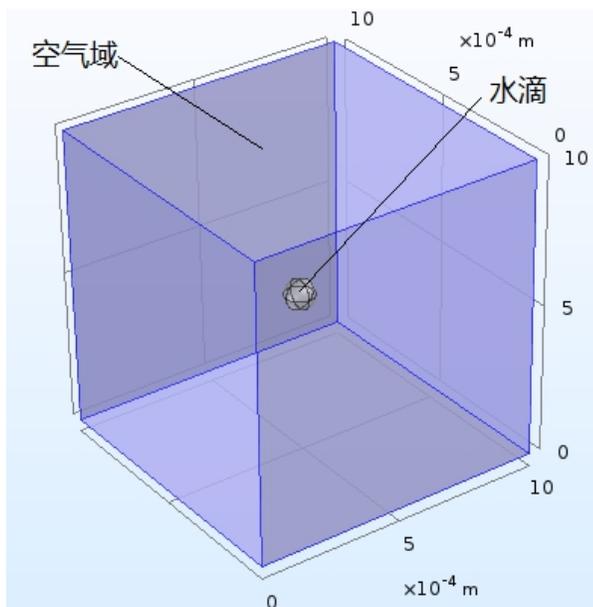




物理模型

模型的建立过程中做出以下几点假设

1. 假设水滴在蒸发冷却直到冻结过程中呈现完美的球形；
2. 水滴受到的力仅为重力、浮力及摩擦力；
3. 在飞行过程中水滴的体积是不断变化的；
4. 空气在水中的扩散过程忽略不计且水滴内部无温度梯度。





数学模型

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q$$

$$q = -k \nabla T$$

ρ 流体密度
 C_p 恒压流体的热容
 K 流体导热系数
 U 流体速度场
 Q 热源

定解条件为第一类边界条件，设置进出口边界条件及初始值如下：

- (1) 进口条件：进口选择温度边界条件设定流体恒定的流入温度。
- (2) 出口条件： $-n \cdot q=0$ 。
- (3) 初始值：根据实际情况设置空气域及水的初始温度。

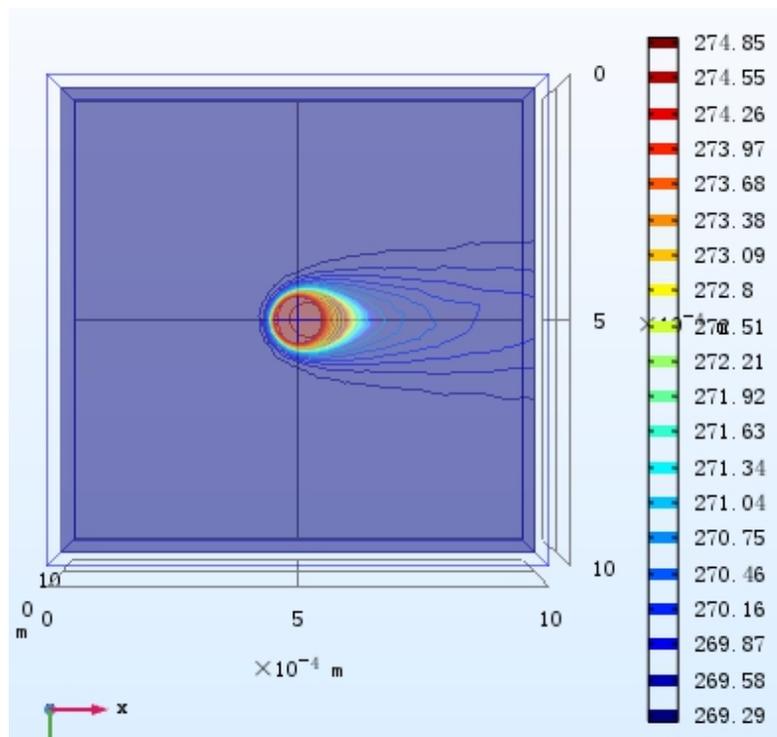
★ 无特别说明

初始条件：环境温度为 -2°C ，水滴温度为 4°C ，风速为 2 m/s 、水滴直径为 $100 \mu\text{m}$

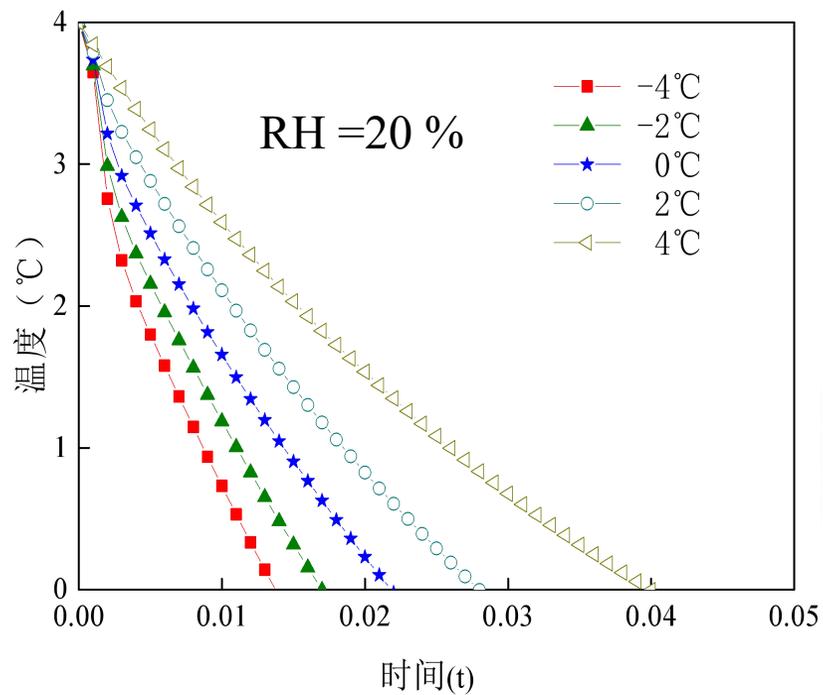




不同环境温度下水滴蒸发冻结时间



$T_a = -4^\circ\text{C}$ $t = 0.01\text{s}$



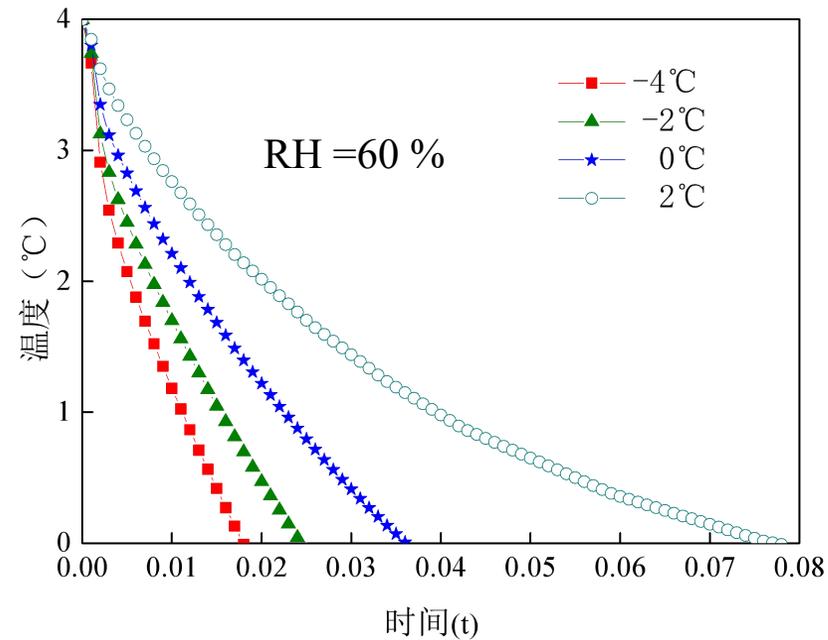
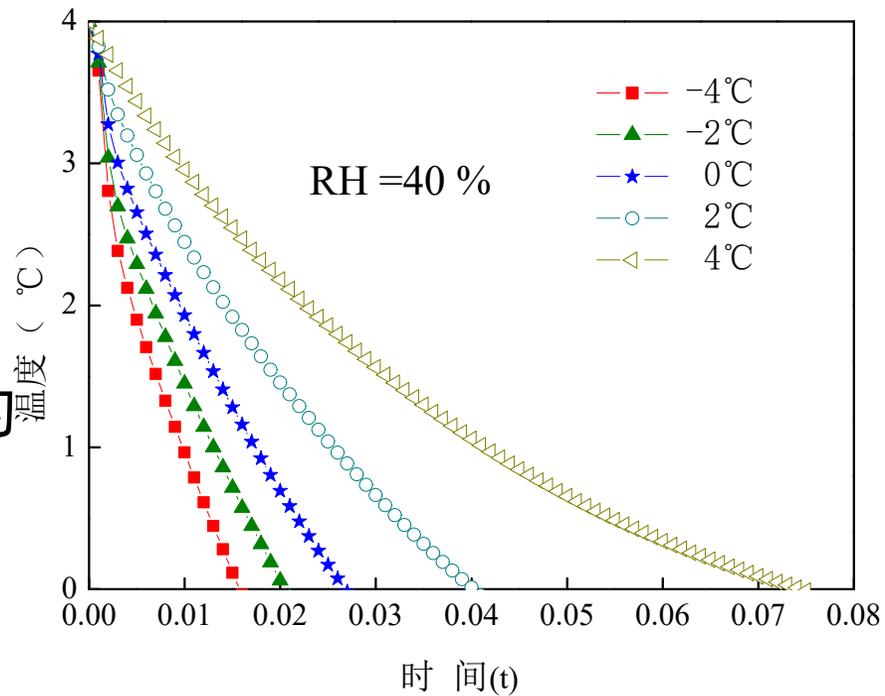
随着环境温度的增加，水滴的冻结时间也在不断增加；曲线近似于线性关系

线性拟合优度 > 95%

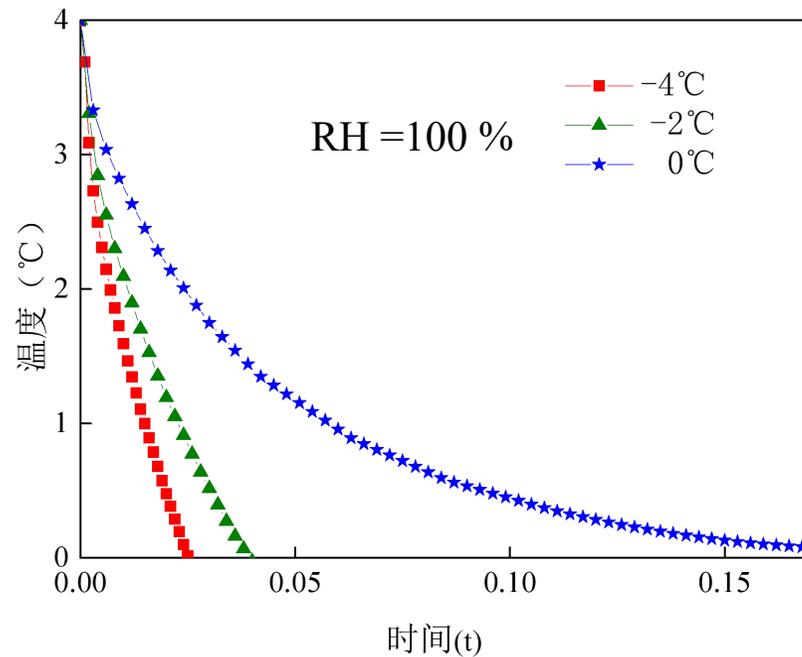
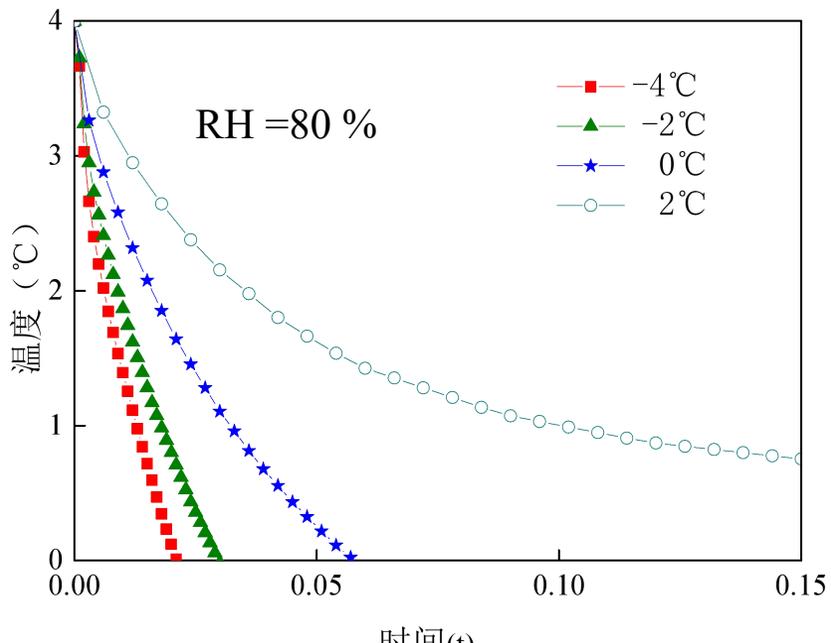




1. 随着相对湿度
的不断增大，水滴的
冻结时间不断延长。

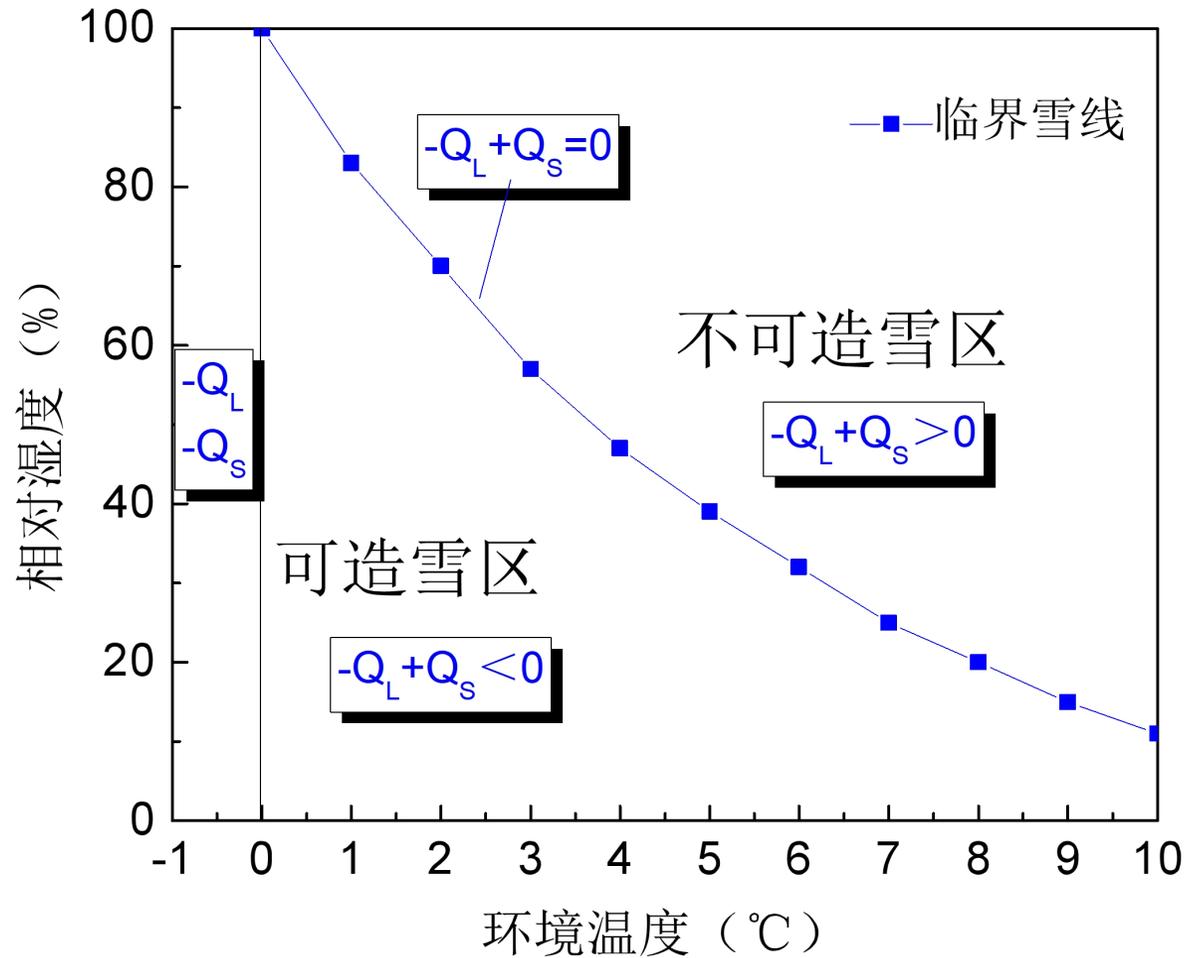


2. 曲线的线性关系
也越来越差，但在
0°C以下仍保持较好
的线性关系





环境温湿度下的造雪区域



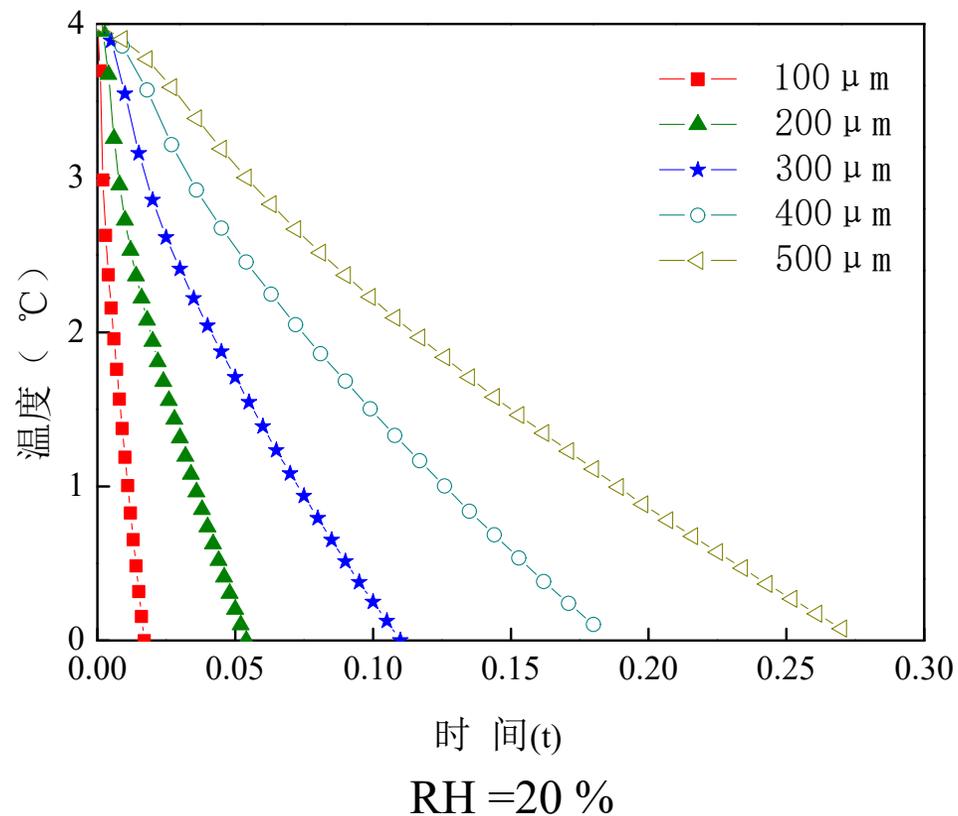
Q_L -水滴蒸发潜热量

Q_S -水滴与环境之间的对流换热量





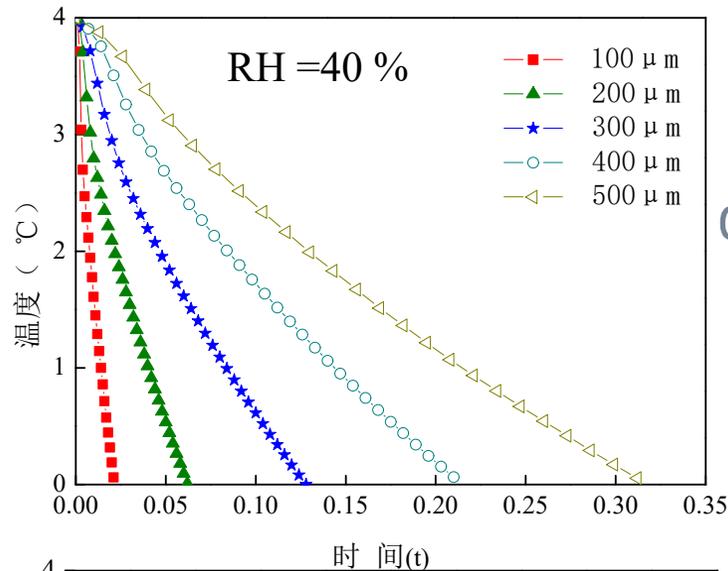
水滴初始直径对水滴蒸发冻结时间的影响



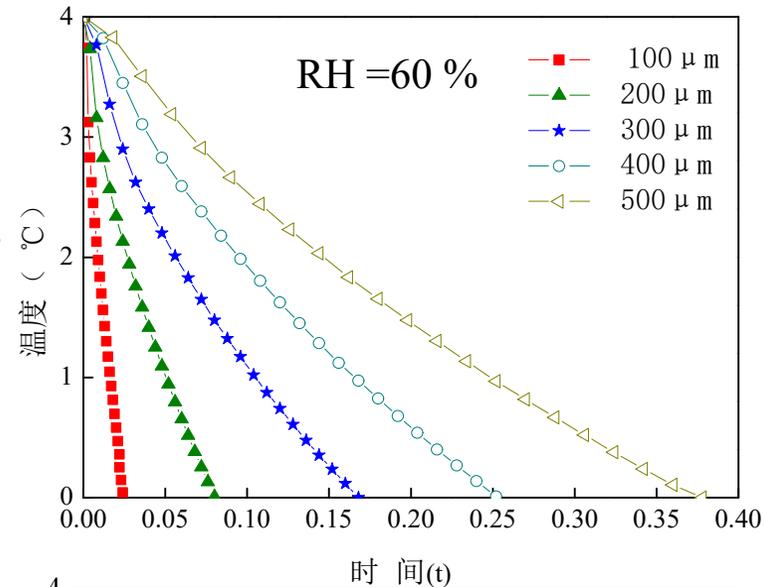
随着水滴粒径的不断增大，冻结时间也不断增加，且两者关系近似线性关系（拟合优度 > 97%）。水滴粒径每增加 $100 \mu\text{m}$ ，冻结时间平均延长 0.065s



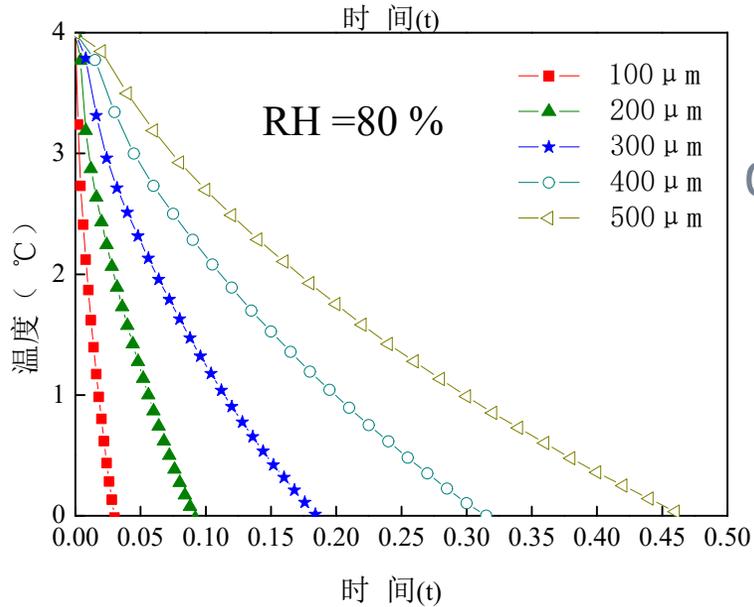
相对湿度影响



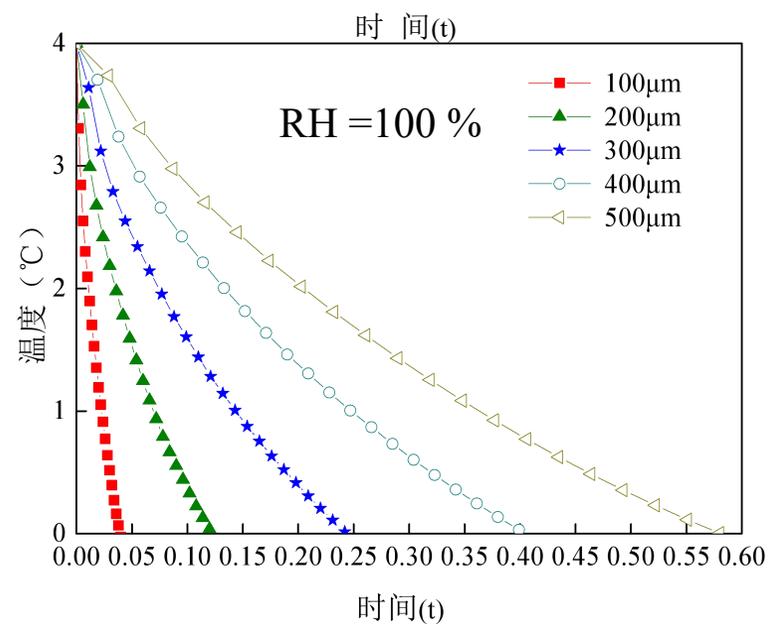
0.075s



0.087s



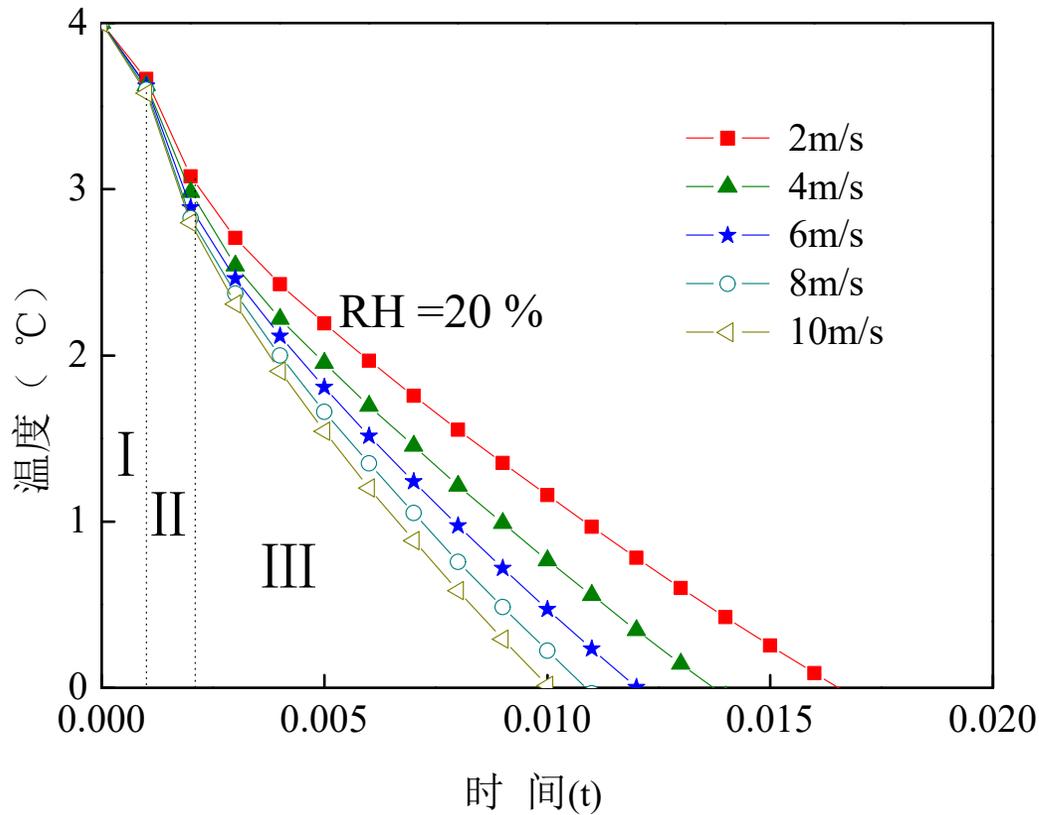
0.11s



0.14s



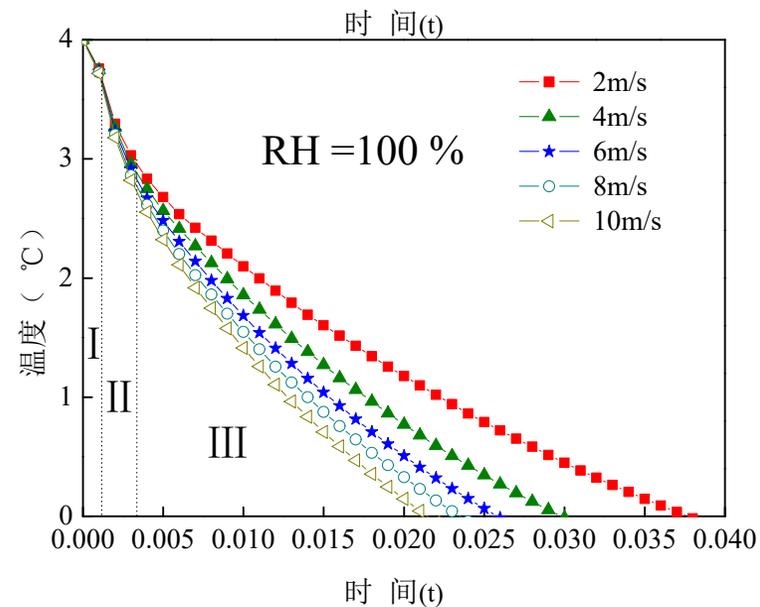
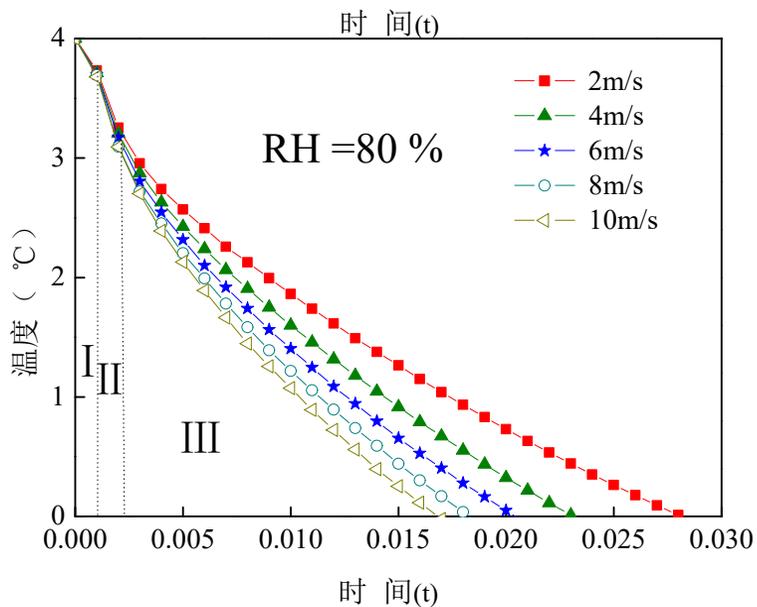
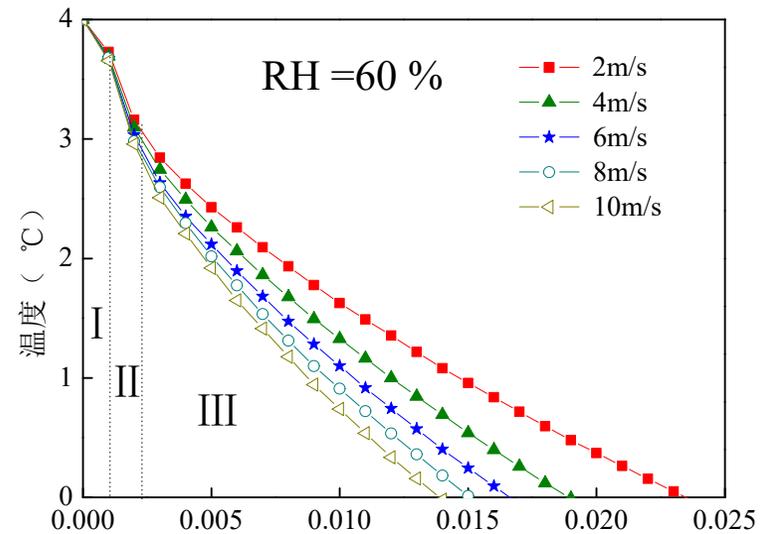
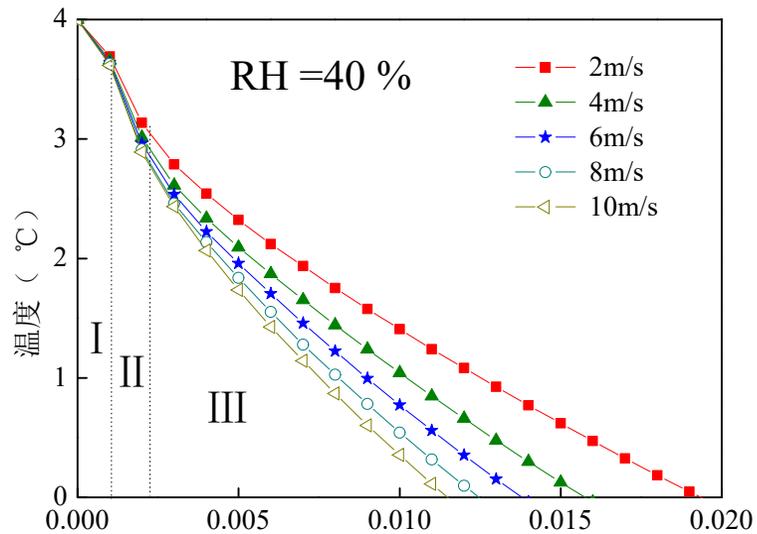
风速对水滴蒸发冻结时间的影响



1. 在区域 I 内，由于初始时外界温度传到水滴中心有延迟，降温速率小于区域 II，随着时间的推移，水滴的冷却蒸发进入到稳定阶段

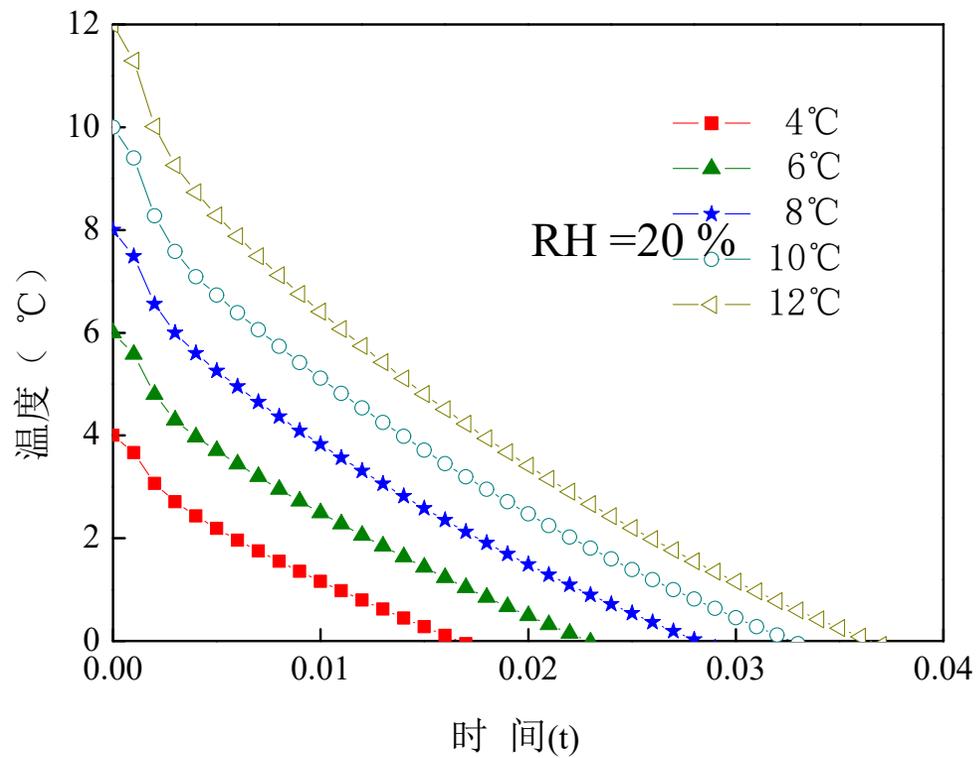
2. 随着风速的增大，对流换热强度增大，但冻结时间的减少量并不明显。对流换热量在总放热中占比较小



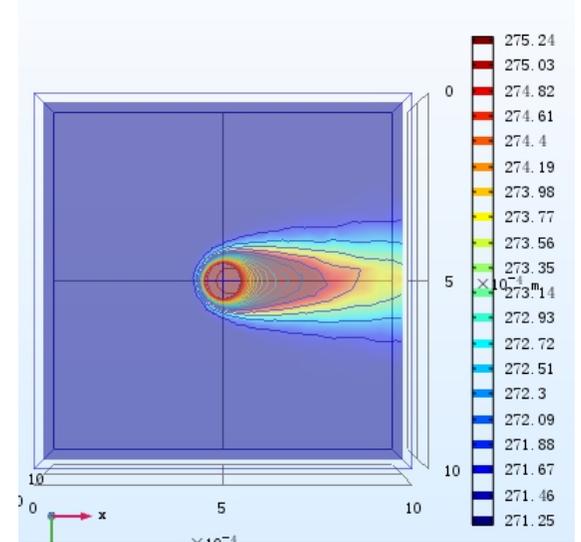




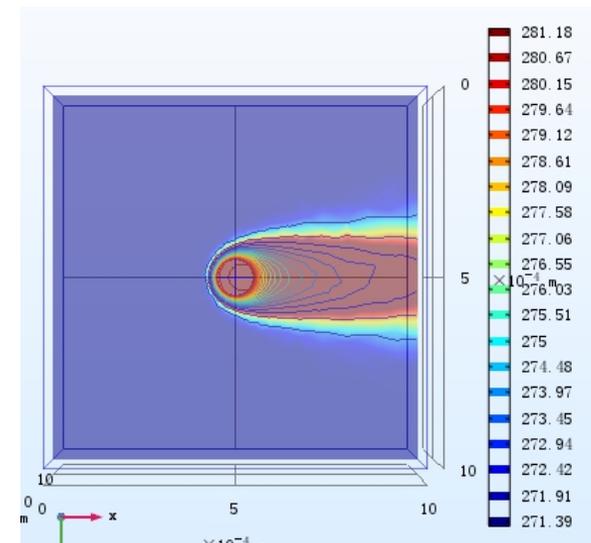
水温对水滴蒸发冻结时间的影响



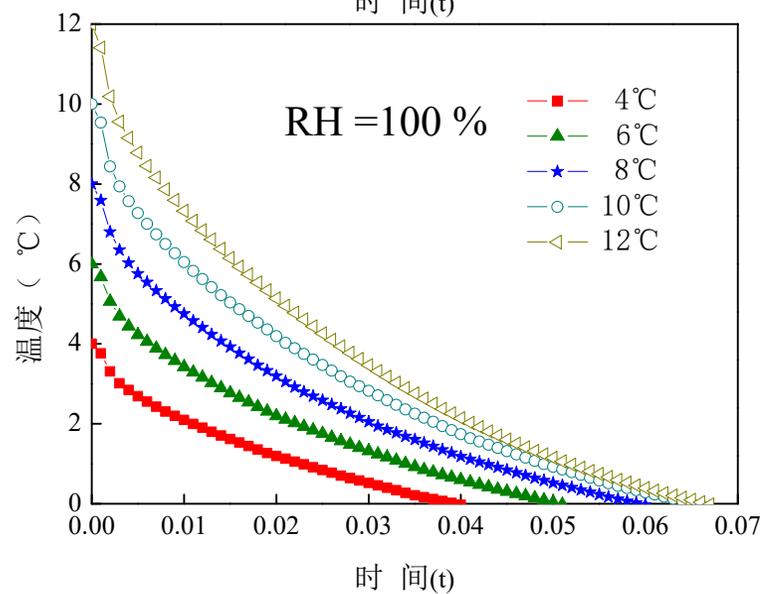
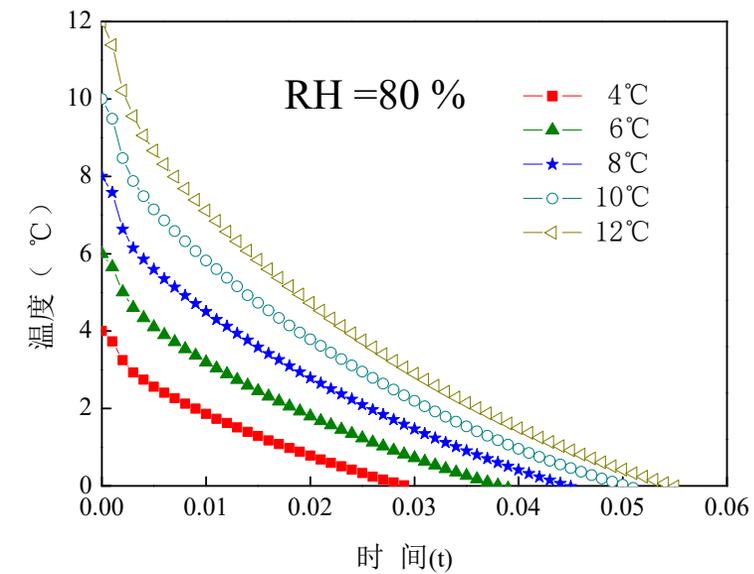
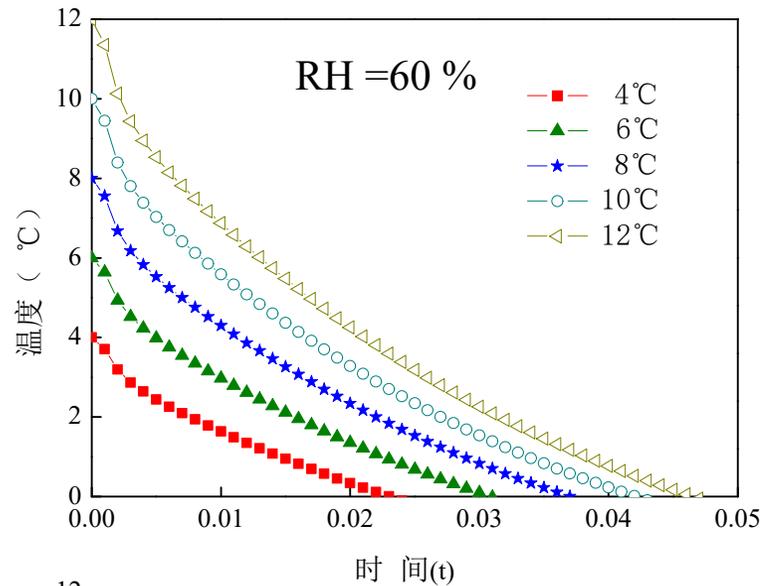
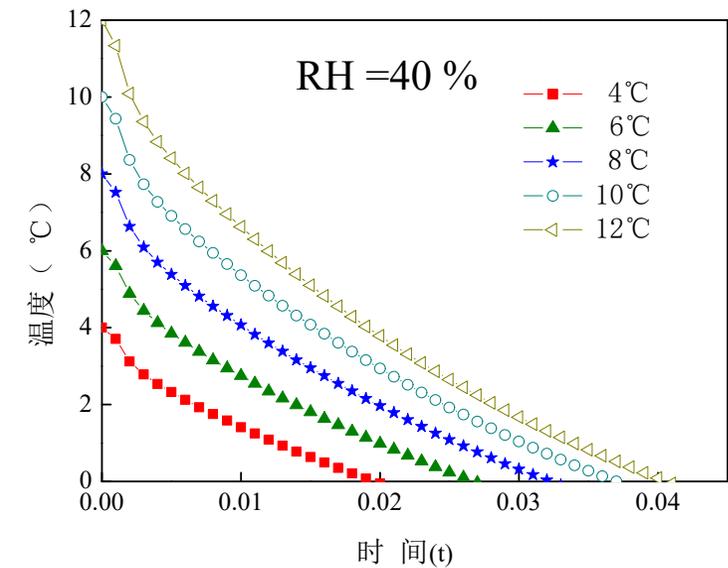
最大初始水温（12°C）与最小初始水温（4°C）之间冻结时间相差不到0.03s，水温对水滴的冻结时间影响较小



4°C



12°C





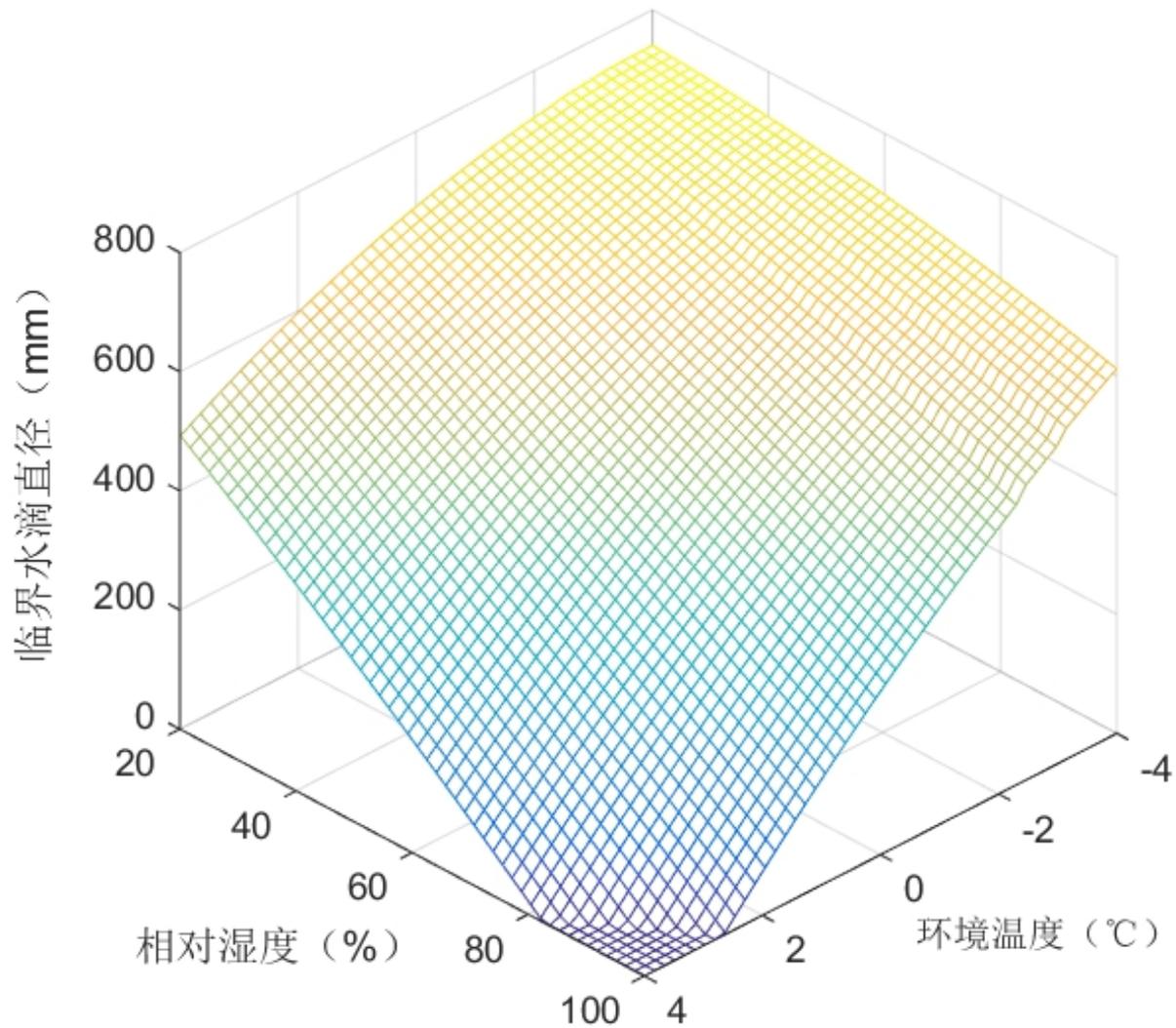
外部温湿度对粒径的影响

	20%	40%	60%	80%	100%
-4	171.101	162.4326	153.2636	143.4904	132.972
-3	165.2595	155.576	145.229	134.0539	121.8009
-2	159.1563	148.2912	136.5547	123.6382	109.0821
-1	152.7559	140.535	127.0883	111.9231	94.03048
0	146.0146	132.1771	116.6071	98.33912	74.62315
1	138.8768	123.0892	104.397	81.43385	×
2	131.2696	113.0671	90.81719	56.45176	×
3	123.0917	101.7751	73.05048	×	×
4	114.2031	88.58064	×	×	×



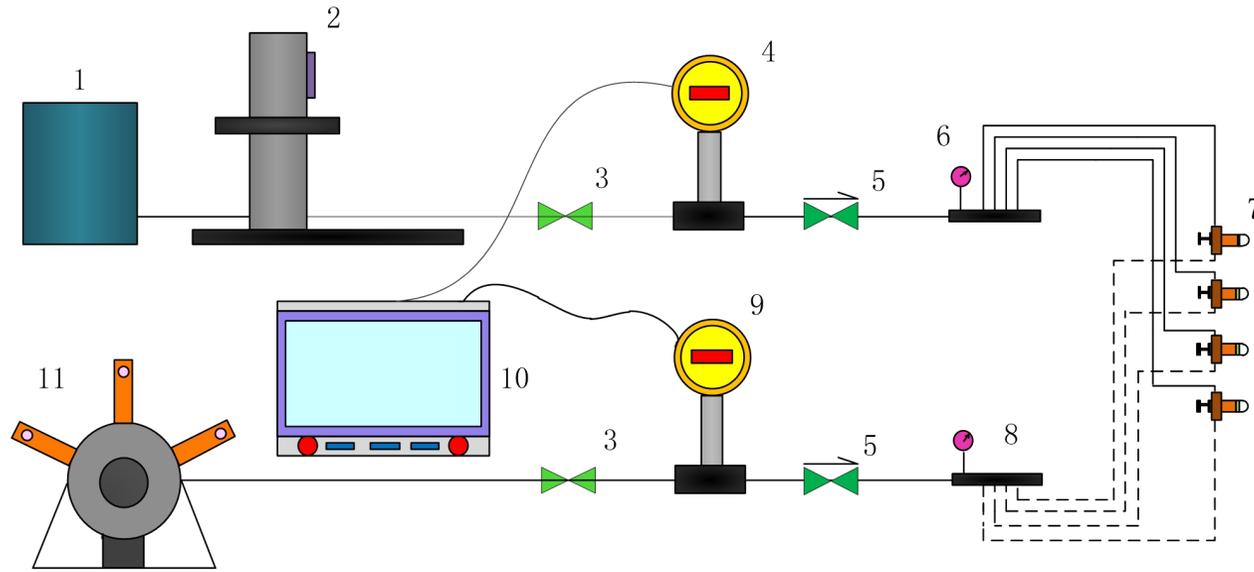


人造雪形成的临界粒径





人造雪的实验研究





天津商业大学
TIANJIN UNIVERSITY OF COMMERCE





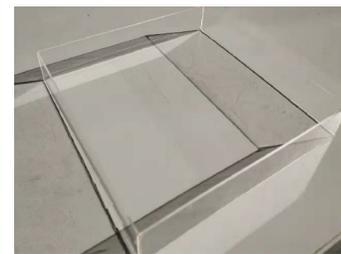
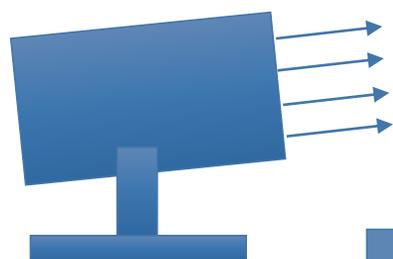
1、不同室外温度的实验

气液混合比	0.06 (±0.007)	0.11 (±0.01)	0.15 (±0.008)	0.2 (±0.01)	0.25 (±0.015)
环境温度℃					
-1.8±0.1	Aa	Ab	Ac	Ad	Ae
-0.3±0.2	Ba	Bb	Bc	Bd	Be
1.1±0.2	Ca	Cb	Cc	Cd	Ce
3±0.6	Da	Db	Dc	Dd	De

$$GLR = \frac{q_{mg}}{q_{ml}}$$

2.不同水温实验

气液混合比为 0.246 ± 0.01 时，做4种不同水温（4℃、5℃、6℃、7℃）的实验，具体与上表类似



4m

1m

1m

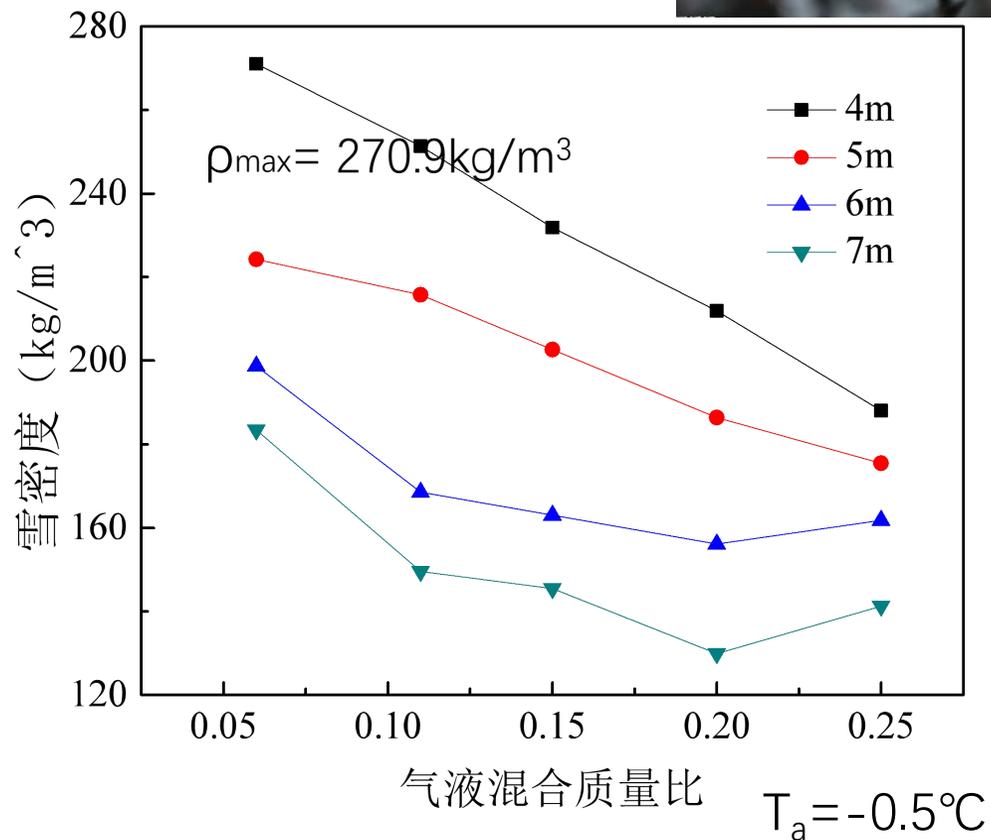
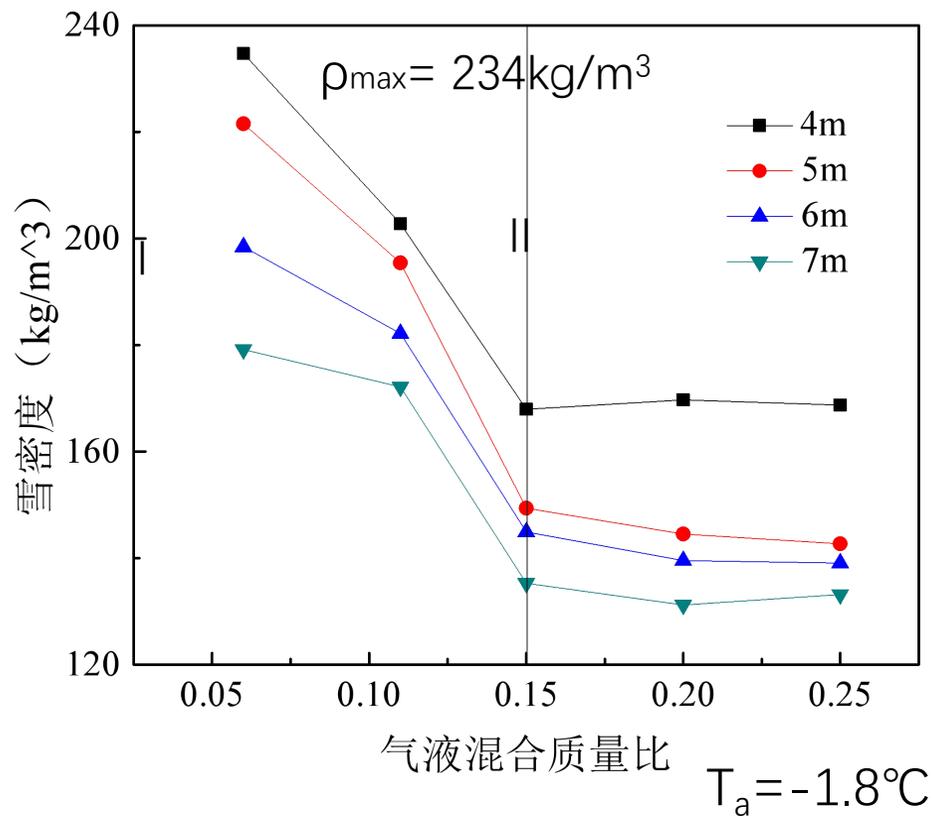
1m



不同落雪距离下雪密度随气液混合比的关系



★ 造雪用水温度为4℃，压缩空气压力为0.7Mpa，环境相对湿度为25±5%

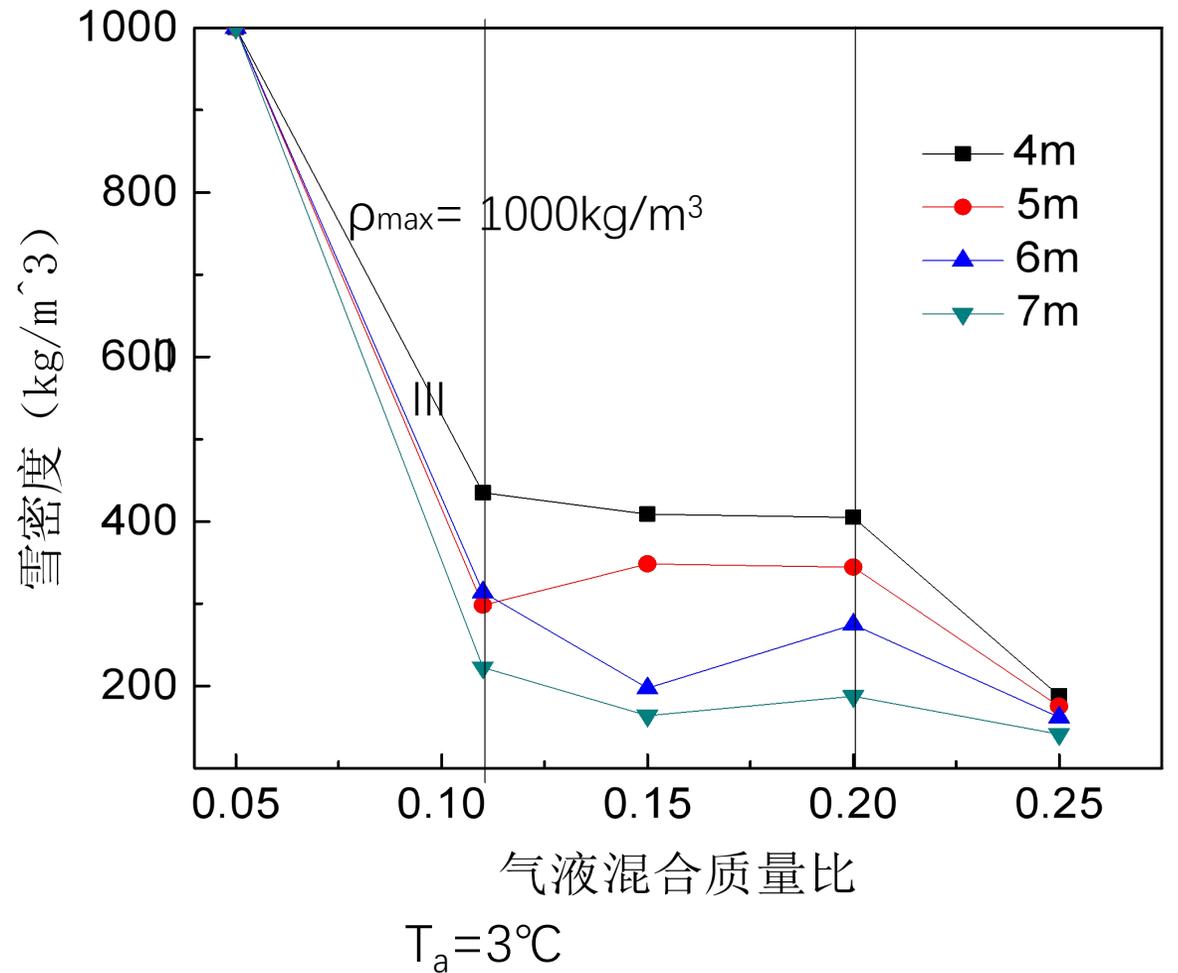
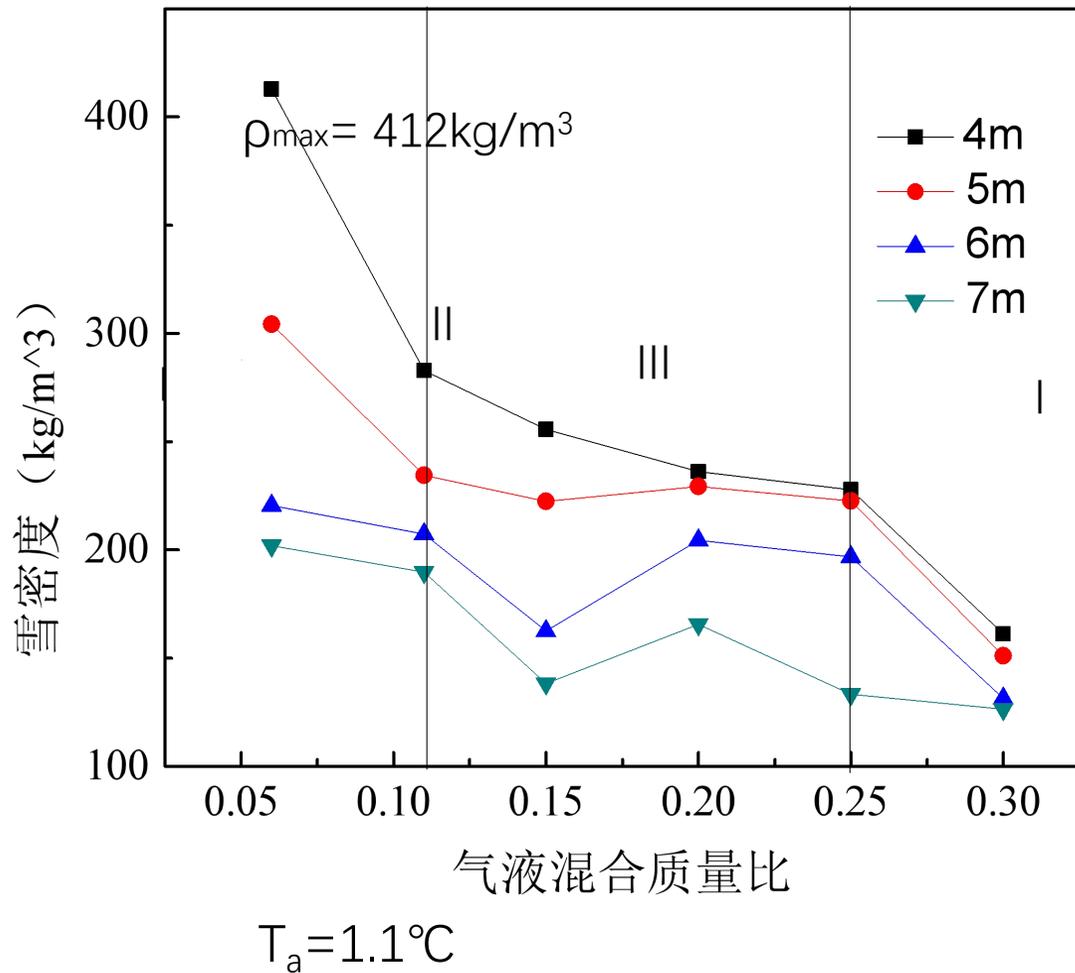


1. 随着落雪距离的增加，受重力因素的影响，水滴粒径越小，导致雪密度值不断减小

2. 气液混合比的增加使液滴破碎程度加大，粒径减小，导致雪密度值不断减小



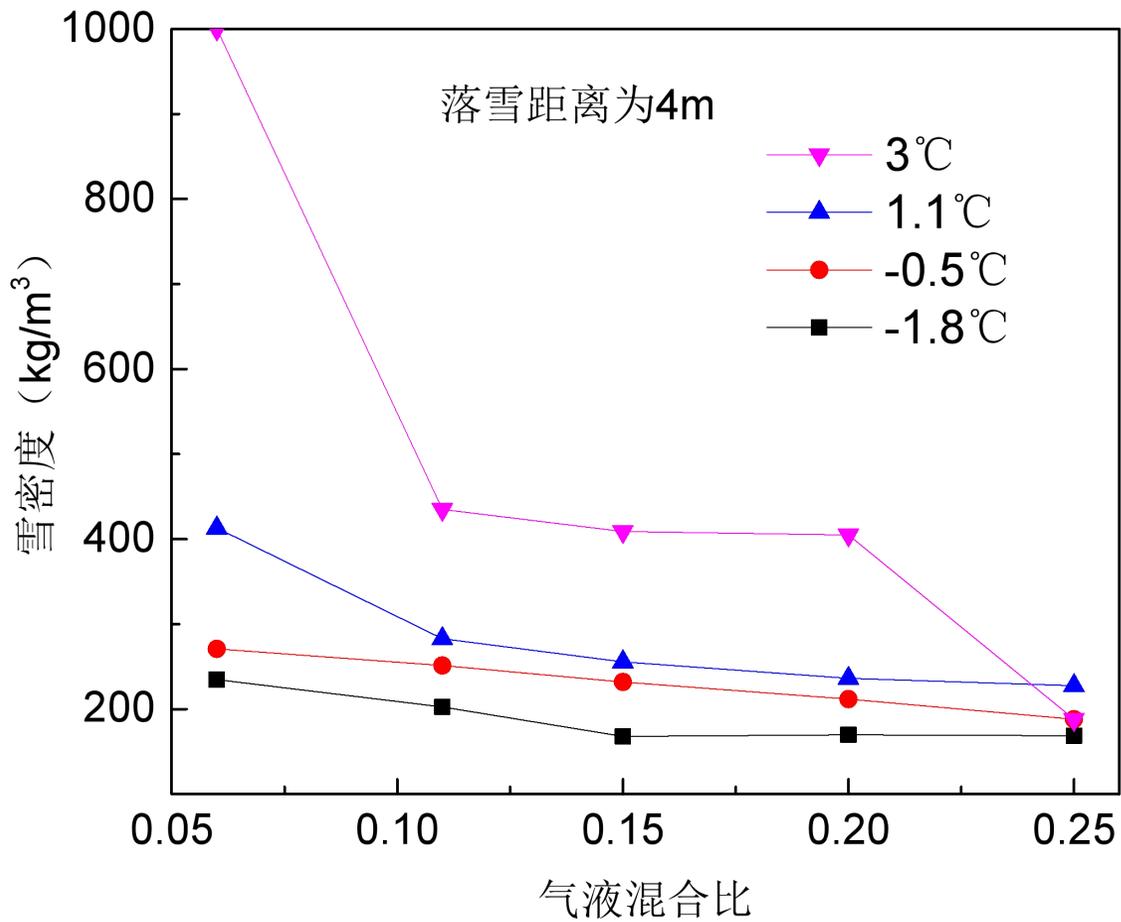
不同落雪距离下雪密度随气液混合比的关系



随着气液混合比的增加，水滴的破碎程度出现三个阶段，在 I 区域内，水滴较大；II 区域内，水滴大小不随气液混合比的增加而增加；III 区域内，水滴完全破碎，粒径小且均匀。不同环境温度下区域的分界点略有区别。

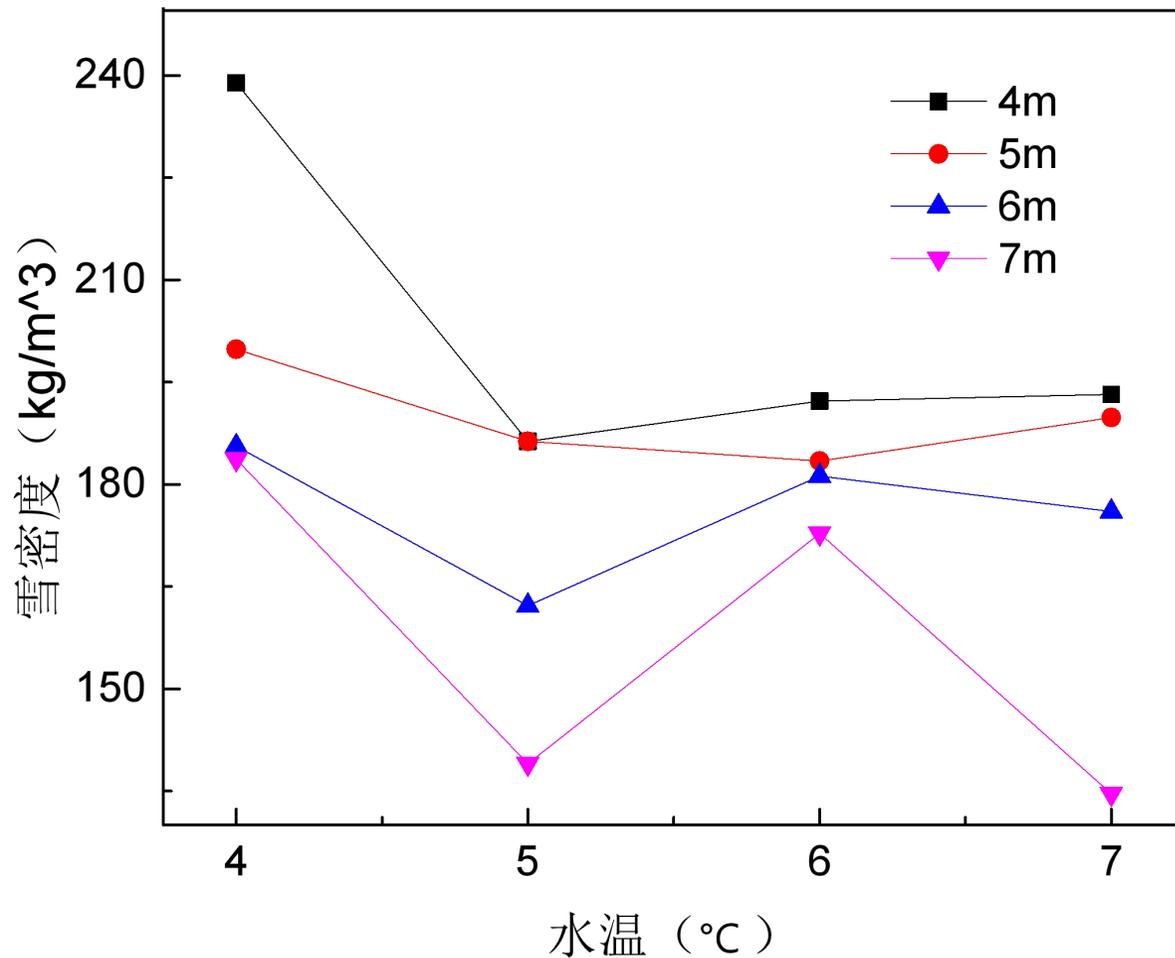


环境温度对雪密度的影响



随着环境温度的增加，雪密度值不断增大，在3°C，气液混合比为0.06时，造出的雪含水量极大，类似于冰浆

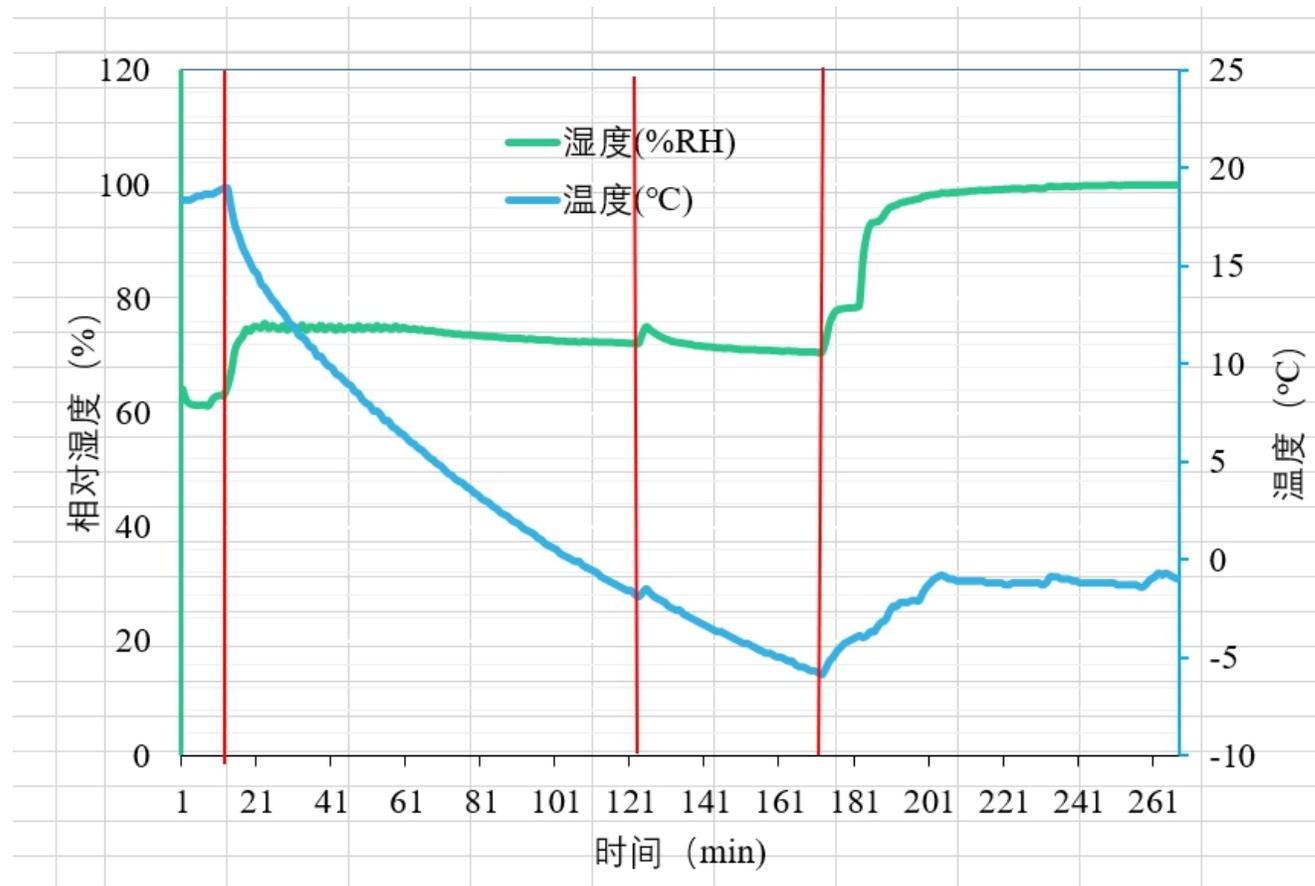
水温对雪密度的影响



水温对雪密度的影响并不明显，随着水温的升高，在落雪距离一定时，雪密度值呈波浪式变化，无明显升降。

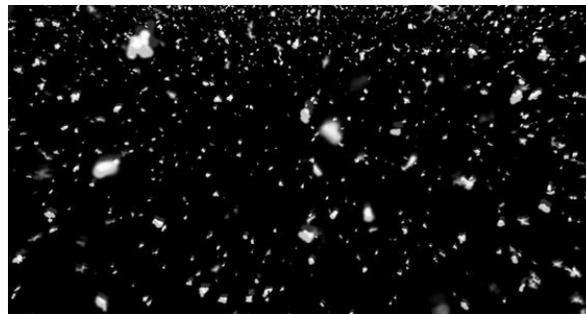


有限空间实验



分为四个阶段：

1. 制冷系统温度阶段，风机电机负荷导致温度升高
2. 连续降温阶段到风机表面结露或结霜
3. 连续降温至加湿阶段
4. 持续加湿，温度升高阶段



利用第4阶段，可用于低温环境热负荷不足，通过喷淋来升高局部环境温度。



结论

结论一：随着环境温度的增加，雪密度值迅速增加，环境温度小于 1.1°C 时，气液混合比在0.06时即可造出密度为 300 kg/m^3 左右的雪，而在 3°C 时由于环境温度高、水滴较大，造出的雪为浆状雪，失去了利用价值。但气液混合比为0.25时，4种温度下的雪密度均小于 300kg/m^3 ，结果表明在较高环境温度，水滴粒径较小时仍可实现低密度造雪。

结论二：在落雪距离相同时，随着气液混合比的增加，雪密度越来越小。在4种不同的环境温度下，雪密度值均呈下降趋势；





结论三：水温对雪密度的影响较小，随着水温的增加并没有明显的变化关系，主要呈波浪式变化，这与模拟结果吻合较好。

结论四：COMSOL模拟的结果显示，环境温度湿度及水滴粒径对水滴冻结时间的影响较大，风速与水温的影响较小（ $<0.03s$ ），故进行造雪作业时应考虑环境温度及相对湿度的影响。

结论五：在低温热泵中，可以通过局部喷淋改变局部环境温度，提高热泵机组效率。





下一步研究内容:

- 1、液滴在空间漂移过程中的碰撞、团聚;
- 2、造雪机喷嘴间距、角度的优化





请各位老师、专家批评指正！

