

低海拔平原地区人工造雪的气象条件分析

周雪婧¹, 杨 婕¹, 郑俊岭¹, 宋叶峰²

¹湖州市气象局, 浙江 湖州

²长兴县气象局, 浙江 湖州

收稿日期: 2026年6月6日; 录用日期: 2026年7月4日; 发布日期: 2026年7月13日

摘 要

为破解低海拔平原地区人工造雪的气象条件制约难题, 提升造雪效率、降低能耗成本, 本文以温度、湿度、风速为核心研究要素, 结合浙江省湖州市低海拔平原人工造雪实践案例, 系统剖析了低海拔平原人工造雪的核心气象逻辑、关键气象要素阈值要求及各要素对造雪质量的影响机制, 并从监测网络构建、窗口期捕捉、技术手段适配三方面提出针对性的气象适配优化策略。研究表明, $-2^{\circ}\text{C}\sim-5^{\circ}\text{C}$ 的温度、 $\leq 60\%$ 的相对湿度、 $\leq 3\text{ m/s}$ 的风速为低海拔平原高效造雪的最优气象阈值, 三者的协同匹配是造雪成功的关键; 通过构建分钟级精准气象监测网络、精准捕捉低温低湿微风的造雪窗口期以及适配专用造雪设备与人工干预技术, 可有效突破低海拔平原低温不足、湿度偏高和风速不稳定的天然气象短板。本文研究成果为低海拔平原地区滑雪场运营、节庆雪景营造等场景的人工造雪作业提供了科学的实操参考, 对推动冰雪运动在低海拔平原地区的普及具有重要实践意义。

关键词

低海拔平原, 人工造雪, 气象条件, 阈值

Analysis of Meteorological Conditions for Artificial Snowmaking in Low-Altitude Plain Areas

Xuejing Zhou¹, Jie Yang¹, Junling Tan¹, Yefeng Song²

¹Huzhou Meteorological Service Center, Huzhou Zhejiang

²Changxing Meteorological Bureau, Huzhou Zhejiang

Received: June 6, 2026; accepted: July 4, 2026; published: July 13, 2026

Abstract

To address the constraints of meteorological conditions on artificial snowmaking in low-altitude

文章引用: 周雪婧, 杨婕, 郑俊岭, 宋叶峰. 低海拔平原地区人工造雪的气象条件分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(4): 719-725. DOI: 10.12677/ccrl.2026.154076

plain areas, improve snowmaking efficiency and reduce energy consumption costs, this paper takes temperature, humidity and wind speed as the core research factors, and combines the practical cases of artificial snowmaking in the low-altitude plain of Huzhou City, Zhejiang Province. It systematically analyzes the core meteorological logic of artificial snowmaking in low-altitude plain areas, the threshold requirements of key meteorological factors and the influence mechanism of each factor on snowmaking quality, compares the differences in snowmaking meteorological conditions between the northern and southern low-altitude plains, and puts forward targeted meteorological adaptation optimization strategies from three aspects: construction of monitoring network, capture of snowmaking windows and adaptation of technical means. The results show that the optimal meteorological thresholds for efficient artificial snowmaking in low-altitude plain areas are a temperature of -2°C to -5°C , a relative humidity of $\leq 60\%$, and a wind speed of $\leq 3\text{ m/s}$, and the coordinated matching of the three is the key to successful snowmaking. By constructing a minute-level accurate meteorological monitoring network, accurately capturing the snowmaking window with low temperature, low humidity and gentle wind, and adapting special snowmaking equipment and artificial intervention technologies, the inherent meteorological shortcomings of low-altitude plains such as insufficient low temperature, high humidity and unstable wind speed can be effectively overcome. The research results of this paper provide a scientific and practical reference for artificial snowmaking operations in scenarios such as ski resort operation and festival snow scene construction in low-altitude plain areas, and have important practical significance for promoting the popularization of ice and snow sports in these areas.

Keywords

Low-Altitude Plain, Artificial Snowmaking, Meteorological Conditions, Threshold

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人工造雪是利用机械设备将水雾化,并在适宜气象条件下使雾滴冷却冻结形成技术雪的过程。目前,人工造雪技术已广泛用于滑雪场雪量补充、雪道建设和大型冰雪赛事保障。随着冰雪旅游扩展和重大赛事保障需求增加,何时适宜造雪、可持续多长时间等问题已成为研究关注点。杨占武等从冬奥雪务保障角度论证人工造雪的必要性,并指出人工造雪系统的效率、水资源的循环利用和当季囤雪是冬奥会人工造雪工作应重点关注的三大关键要素[1]。毛明策等分析了北京冬奥会人工造雪地面气象条件,指出降水相态与地面气温和相对湿度线性组合关系密切,推动造雪条件判断由经验认识向定量分析转变[2]。此外,围绕北京冬奥赛区,朱志强等进一步考察不同天气过程下温度、湿度和风场对作业窗口的影响[3],并结合场地实地特征,分析了雪道技术标准、保护方案、造雪水系统设计及不同海拔、特殊温度的造雪等问题[4]。

随着对人工造雪研究逐步深入,人工造雪的分析逐渐由单次作业保障拓展至成雪机理、气候风险和雪场运行管理。刘国强等研究指出人工造雪技术的核心是通过节流制冷制造低温环境,从而催化晶核的生成,并吸附破碎雾滴成长成雪花,且湿球温度是人工造雪活动的触发依据[5]。董佩文等对成雪过程的进一步解释也表明,雾滴在空中的冷却条件和停留时间是能否顺利冻结的重要环节[6]。方琰等指出在全球气候变暖背景下,人工造雪技术进步能够在一定程度上延长滑雪季,但其作用幅度仍明显受区域温度和湿度条件限制[7]。此外,邓婕等通过积雪模拟把自然降雪、人工造雪、融化和雪道维护纳入统一框架,

为估算造雪需求和判断保雪时段提供了新的技术路径[8]。对于冰雪运动气候适宜性研究, 则从区域尺度说明低温持续性、风速、降雪及天气稳定程度均会影响冰雪活动的开展条件[9] [10]。Olefs 等基于气温和相对湿度分析人工造雪的边界条件, 强调以湿球温度识别可造雪时段, 为造雪窗口期判定提供了量化依据[11]。EBNER PP 等将地面观测、天气预报与雪层模拟相结合, 可为人工造雪提供动态决策支持, 提升造雪作业的科学性[12]。

总体来看, 现有成果已经形成从气象条件识别、造雪窗口判定到积雪模拟和运行决策的研究脉络, 但研究区域仍多集中在北方赛事场地以及高纬、高海拔雪场。而相较于高海拔山区, 南方低海拔平原冬季冷空气过程往往持续较短, 且冬季气温多在 0℃ 上下波动、空气湿度普遍偏高、地形平坦导致风速影响更直接, 造雪气象条件存在天然短板。因此, 本文聚焦湖州低海拔平原人工造雪的核心气象要素, 剖析温度、湿度和风速等条件的核心阈值要求、对造雪质量与成本的影响机制, 以及针对性的实践适配策略, 旨在为低海拔平原地区相关场景的高效、低成本造雪提供实操参考。

2. 人工造雪的核心气象逻辑

人工造雪并非“无中生有”, 而是通过技术手段模拟自然降雪的水汽凝华过程: 造雪机将高压水雾化人工造雪的气象适宜性是由气温、相对湿度和风速等要素共同决定的。气温控制液滴与环境之间的温差, 相对湿度影响雾滴蒸发冷却强度, 两者综合形成的湿球温度能够较好反映空气的实际冷却能力, 是人工造雪气象条件判定的重要指标[11]。而风速一方面影响雾滴与冷空气的热量交换, 另一方面决定雪粒的输送路径和落区分布, 风速过大或风向变化剧烈时容易造成雪粒飘移、有效堆积减少和雪面分布不均[5]。

人工造雪并非“无中生有”, 而是通过造雪设备将液态水机械雾化为微小液滴后, 利用低温空气中的显热交换和蒸发冷却使液滴迅速降温, 随后经过成核和冻结形成技术雪。这一过程可以概括为“液态水雾化-蒸发冷却与对流换热-成核冻结-雪粒沉降堆积”。液滴能否在有限的空中停留时间内充分降温并完成冻结, 是决定造雪能否成功及雪质的重要因素, 其过程同时受到环境温湿度、风场条件、液滴粒径和设备运行状态等因素制约[13]。而低海拔平原地区的气象条件恰恰在“低温”和“凝结环境”上存在天然短板, 需通过精准研判与技术适配突破限制。因此, 低海拔平原人工造雪不能依据单一气象要素作出判断, 而应综合考虑温度、湿度、风速及后续天气变化, 在有利气象窗口内合理安排作业。

3. 低海拔平原人工造雪成功实践案例——以浙江湖州为例

湖州作为南方湿润型低海拔平原的典型代表, 其长兴八都岙、原乡小镇等多个大型户外滑雪戏雪场的成功运营, 是低海拔平原地区适配气象条件开展人工造雪的鲜活案例。本文依托湖州长兴潘礼南村气象观测站的监测数据与实际造雪运营经验, 分析低海拔平原造雪的气象条件特征与窗口期把控要点。

3.1. 观测站点与数据基础

湖州长兴八都岙滑雪场附近的长兴潘礼南村站 2006 年建站, 初始为气温、降水、风速、风向四要素观测站; 2016 年 12 月 1 日起新增湿度和气压观测, 升级为六要素观测站。本文以该站建站以来每年 12~2 月的温湿度小时监测数据为基础, 结合当地实际积雪情况, 梳理出区域积雪形成与维持的气象条件特征, 为低海拔人工造雪作业提供数据支撑。

3.2. 典型积雪过程气象数据特征(2018 年 1 月 25~31 日)

为验证区域积雪形成与维持的气象条件特征有效性, 选取 2018 年 1 月 25~31 日湖州长兴出现持续性

积雪过程进行逐小时对比分析。该过程温湿度、风速的动态变化与造雪窗口期高度契合，具体数据特征如下(见表 1)。

相对湿度 80%以上监测数据分布在 50%~60%，仅 1 月 27 日前后受冷空气影响出现短暂下降，最低至 44%，形成低湿环境；气温 80%以上监测数据分布在-2℃以下，1 月 27 日出现最低值-11.1℃，1 月 29 日起气温回升至 0℃以上，呈现明显的“降温 - 升温”过程；风速 80%以上数据稳定在 0~3 m/s，仅 1 月 26 日降温阶段出现短暂峰值 5.4 m/s，整体为微风环境。

通过趋势关联性分析，此次过程中降温与湿度协同性良好，过程前期形成“低温低湿”的优质造雪窗口期，与低海拔平原造雪的气象条件要求高度匹配；1 月 29 日起气温回升至 0℃以上，相对湿度维持 90%以上，积雪开始出现融化现象，造雪与保雪条件均大幅恶化。

Table 1. Statistics of key meteorological elements at Panlinan village station, Changxing, Huzhou, January 25~31, 2018
表 1. 2018 年 1 月 25~31 日湖州长兴潘礼南村站核心气象要素统计

气象要素	平均值	主要分布区间	极端值	关键特征
相对湿度	56.10%	50%~60%	最低 44% (1 月 27 日)	冷空气过境时出现短暂低湿
气温	-2.8℃	-5℃~-2℃	最低-11.1℃ (1 月 27 日)	1 月 29 日起气温回升至 0℃以上
风速	1.4 m/s	0~3 m/s	最大 5.4 m/s (1 月 26 日)	整体为微风，降温期出现短暂阵风

3.3. 造雪窗口期把控的实践成效

2025 年 12 月湖州某滑雪场筹备试运营期间，气象部门通过精准预报发现，原计划开业的 24~25 日将出现小雨及回暖天气，气温升至 0℃以上、湿度升至 80%以上，完全不具备造雪与保雪条件；而元旦期间受强冷空气影响，当地气温将降至-4℃左右，湿度降至 55%以下，风速维持在 2 m/s 左右，恰好契合高效造雪的气象阈值。

基于气象预报结果，气象部门建议滑雪场推迟至元旦期间运营。该建议落地后，滑雪场在元旦优质气象窗口期开展造雪作业。根据运营方反馈，造雪效率显著提升，能源消耗明显降低，造雪综合成本得到有效控制，充分验证了精准捕捉气象窗口期对低海拔平原人工造雪的重要性。

4. 低海拔平原人工造雪的关键气象条件及阈值要求

低海拔平原人工造雪需同时满足温度、湿度和风速三大核心气象条件，三者相互制约、协同作用，任一条件不达标都会影响造雪效率、雪质品质甚至导致造雪失败。结合近 20 年自动站数据分析及湖州实践，本文明确了三大要素的临界阈值与最优阈值，为造雪作业提供量化标准(见表 2)。

Table 2. Thresholds of key meteorological elements for artificial snowmaking in low-altitude plains
表 2. 低海拔平原人工造雪核心气象要素阈值表

气象要素	最优区间	临界阈值
温度	-2℃~-5℃	≤0℃
湿度	≤60%	≤65%
风速	≤3 m/s	≤5 m/s

4.1. 温度

温度是人工造雪的基础气象要素，业界普遍认可 0℃为人工造雪的最低临界温度：当环境气温高于

0℃时，雾化后的水滴会直接以液态形式落地，无法形成冰晶，还可能导致造雪机喷嘴结露、结冰堵塞，造成设备故障。低海拔平原冬季气温昼夜差异大，日间气温多回升至 0℃以上，夜间气温常接近 0℃，结合实践数据，-2℃~5℃为低海拔平原造雪的最优阈值，这一温度区间内，气温足够低且无极端低温的设备损耗，既能保证雾化水滴快速凝结成冰晶，形成的雪晶呈六角形片状，蓬松度高、含水量适中，雪质最接近自然雪。

4.2. 湿度

历史数据分析表明，相对湿度 $\leq 60\%$ 为人工造雪的临界阈值，当空气相对湿度低于 60% 时，雾化水滴的蒸发散热速度快，能快速降低自身温度并凝结成冰晶，造雪效率高且雪质干燥蓬松；若相对湿度超过 60%，空气水汽含量接近饱和，水滴蒸发散热受阻，凝结速度大幅变慢，部分水滴会在沉降过程中相互粘连，形成硬邦邦的“冰粒”。南方低海拔平原冬季相对湿度常达 70% 以上，单纯依赖自然湿度难以满足造雪需求，需通过人工干预降低局部环境湿度。

4.3. 风速

低海拔平原地形平坦、无地形遮挡，风速对人工造雪的影响主要体现在雪花沉降路径和积雪均匀度上，风速过大或不稳定都会导致造雪效率下降、积雪分布不均，增加后期整理成本。结合实践经验，风速 $\leq 3 \text{ m/s}$ 为低海拔平原造雪的最优阈值，此时的微风环境既能让雾化后的水滴充分在空中悬浮、冷却凝结，保证冰晶形成的完整性；又能保证雪花垂直沉降，实现积雪均匀堆积，大幅提升造雪作业的有效性。

若风速较大，雪花会被快速吹散，无法形成有效堆积，此时应立即停止造雪作业，避免水资源与能源的浪费。

5. 低海拔平原人工造雪的气象适配优化策略

针对低海拔平原低温持续短、湿度偏高、风速不稳定的气象天然短板，结合气象监测技术、造雪作业时段选择和造雪技术适配，构建“精准预判 - 高效利用 - 人工干预”的造雪气象保障体系，可有效提升造雪效率与雪质品质，降低造雪能耗与运营成本。

5.1. 构建分钟级精准气象监测网络，实现气象条件动态预判

精准的气象监测是造雪窗口期捕捉的基础，需依托多元化气象监测设备，构建覆盖造雪区域的分钟级精准监测网络，实现核心气象要素的实时、动态、精准监测。整合气象雷达、地面固定观测站、造雪区域便携式传感器，实现气温、相对湿度、风速、风向、气压等核心指标的全方位监测，传感器布设密度以 500 米/个为宜，确保监测数据覆盖所有造雪区域；通过大数据建模对监测数据进行实时分析，预判造雪窗口期——当监测到夜间气温将持续 4 小时以上低于 -2℃、相对湿度 $\leq 60\%$ 且风速 $\leq 3 \text{ m/s}$ 时，即为优质造雪窗口期，可启动大规模造雪作业；结合短期气象预报，提前发布寒潮、降雨、高湿、大风等不利天气预警，避开不利气象时段，提前规划造雪计划，减少无效作业。

5.2. 精准捕捉造雪窗口期，最大化利用自然气象条件

低海拔平原造雪窗口期有限，需根据南北气候差异，针对性捕捉最优造雪时段，最大化利用自然气象条件，减少人工干预成本。优先利用冬季夜间低温时段、晴朗少云天气开展作业，此时段气温低、湿度相对较低、风速稳定，造雪效率最高；低海拔平原冬季低温时段短且分散，需抓住寒潮过境后的低温低湿窗口期，开展集中造雪；利用自然降雪后的低温时段补充造雪，此时空气湿度较低，且地面已有积

雪铺垫,能减少雪花融化损失,提升造雪效率。

5.3. 结合技术手段适配气象短板,实现人工干预补位

针对低海拔平原湿度偏高、温度波动大的核心气象问题,选用适配性更强的造雪设备与人工干预技术,弥补自然气象条件的不足,实现造雪作业的稳定性。优先选用炮筒式造雪机,其通过高压空气膨胀散热辅助冷却,在气温接近 0℃ 的临界状态下,仍能提升水滴凝结效率,适配低海拔平原的温度波动特征;在造雪区域周边布设地面烟炉、工业除湿设备,通过加热、抽湿等方式降低局部环境湿度,将造雪区域相对湿度控制在 60% 以下,为造雪创造干燥的凝结环境;对于室内造雪滑雪场,严格控制室内环境温度在-5℃ 左右、相对湿度 60%~70%,完全规避室外气象条件的影响,实现全年造雪运营,打破季节与气象的限制。

6. 结语

低海拔平原人工造雪的核心,是在自然气象条件约束下,实现温度、湿度、风速三大核心要素的协同适配。相较于高海拔山区,低海拔平原虽存在低温持续短、湿度偏高、风速不稳定等天然气象短板,但通过精准的气象监测、科学的窗口期选择、针对性的技术适配,完全可以突破制约,实现高效造雪与优质雪质保障。

湖州的实践案例充分证明,当气温处于-2℃~-5℃、相对湿度 $\leq 60\%$ 、风速 $\leq 3\text{ m/s}$ 的最优气象阈值时,造雪效率最高、雪质最佳、能耗最低,更加适应南方地区湿润气候特点;而精准捕捉这一“低温低湿微风”的气象窗口期,是实现造雪成本节约的关键。

随着人工影响天气技术的不断发展,尤其是立体化监测网络和精准催化技术的升级,低海拔平原人工造雪将进一步摆脱“靠天吃饭”的局限,为冰雪运动普及、生态保障、节庆场景营造等多领域提供更坚实的气象支撑。未来,需持续深化气象条件与造雪技术的融合研究,针对南北低海拔平原的气候差异优化适配策略,进一步降低造雪能耗,推动低海拔平原人工造雪的可持续发展;同时,可开展造雪气象阈值的区域化研究,为不同纬度、不同气候类型的低海拔平原地区制定个性化的造雪气象保障方案。

参考文献

- [1] 杨占武. 北京冬奥会和冬残奥会人工造雪的研究[J]. 冰雪运动, 2017, 39(1): 1-8.
- [2] 毛明策, 王琦, 田亮. 2022 年北京冬季奥运会人工造雪气象条件初步研究[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 547-552.
- [3] 朱志强, 王飞, 王东海, 等. 2016-2017 雪季冬奥会“窗口期”气象资料分析与建议[J]. 上海体育学院学报, 2019, 43(1): 43-50.
- [4] 朱志强, 王飞, 王东海, 刘石, 傅博. 2022 年北京冬奥会造雪关键问题研究[J]. 体育科学, 2020, 40(10): 31-40.
- [5] 刘国强, 熊通, 晏刚, 等. 人工造雪技术现状与研究进展[J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 1-16.
- [6] 董佩文, 刘国强, 张博文, 等. “冰雪魔术”变水成雪: 人工造雪技术[J]. 科学通报, 2022, 67(21): 2447-2449.
- [7] 方琰, Daniel Scott, Robert Steiger, 吴必虎, 蒋依依. 气候变化背景下人工造雪技术提升对中国滑雪季节长度的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1210-1222.
- [8] 邓婕, 车涛. 滑雪场积雪模拟研究进展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 381-389.
- [9] 刘耀龙, 张华明, 黄晓丽, 等. 山西省冰雪运动气候适宜性评价[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 173-179.
- [10] 李淑娟, 毛炜峰, 陈静, 等. 北疆冰雪运动气候适宜性及其变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(5): 537-547.
- [11] Olefs, M., Fischer, A. and Lang, J. (2010) Boundary Conditions for Artificial Snow Production in the Austrian Alps. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1096-1113. <https://doi.org/10.1175/2010jame2251.1>
- [12] Ebner, P.P., Koch, F., Premier, V., Marin, C., Hanzer, F., Carmagnola, C.M., et al. (2021) Evaluating a Prediction System

-
- for Snow Management. *The Cryosphere*, **15**, 3949-3973. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3949-2021>
- [13] Liu, B., Hu, H., *et al.* (2023) Analysis of the Characteristics of the Gas-Liquid Mixed Artificial Snow-Making. *International Journal of Refrigeration*, **149**, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.12.025>