



为冰雪运动测风、造雪、制冰，一系列自主研发技术打造一流冬奥赛道

# 科技造雪筑梦，演绎绿色“冰雪奇缘”

冰与雪是冬奥会的“灵魂”。北京冬奥会的冰雪赛场上，运动健儿们尽展英姿的背后，无处不在的科技力量支撑着冰之飞舞、雪之竞速。从世界首次应用的近零排放二氧化碳直冷制冰到光滑如镜的冰状雪赛道，为了这场家门口的世界级体育盛会，早在数年前，科学家就开始了科研攻关，啃下一块块“硬骨头”，用中国智慧与绿色理念演绎一段令世界惊叹的“冰雪奇缘”。

## 造雪保雪储雪 实现绿色“用雪自由”

造雪、保雪、储雪是保障滑雪竞技项目顺利进行的保障。然而，中国冰雪科研起步较晚，举办国际高水平冰雪赛事可供借鉴的经验也较少。为此，一批科技工作者花了五年多时间踏雪筑梦，不仅成功研制出符合北京大陆性季风气候的“冰状雪赛道”，还研发出高效储雪技术，真正实现了绿色“用雪自由”。

高山滑雪项目被誉为“冬奥会皇冠上的明珠”，运动员在赛程中的平均时速约为每小时130至140千米，最高滑行速度可达每小时248千米，因此赛道必须光滑而坚硬。而冰状雪的制造正是铸造这一明珠的基石。

何谓“冰状雪”？天然雪的雪质主要有冰状雪、粉状雪、浆状雪等。不同的温度和光照都会影响雪的质地。比如，清晨气温较低，雪的凝固程度高，水的密度很大，雪质偏硬，其表面有一层薄的硬冰壳，人站在上面都会打滑，这种雪质状态就是冰状雪。冰状雪铺就的赛道可以减少雪道表面与滑雪板之间的摩擦，很适合高速滑行——相当于高山滑雪比赛等项目的“高速公路”。

更重要的是，冰状雪赛道在比赛过程中不容易损坏，哪怕最后出场的选手也可以拥有完美的赛道，确保了整个比赛的公平性。

由于天然雪雪质难以控制，冰雪运动赛道不得不采用人工造雪的方式来搭建。冰状雪赛道分为两种，即竞速冰雪赛道和竞技冰雪赛道。

竞速冰雪赛道需要对人造雪进行反复翻、压，重复多次直到赛道平整。比赛前夕，压雪车会将雪道翻开，雪块打碎，形成约40厘米的疏松雪层后，再用水炮对其进行注水；在注水的过程中，不停对湿雪进行反复翻、压，直到搅打均匀为止，以确保冰状雪的雪层厚度一致；最后再检查有无大的孔洞后，快速将赛道压平。

竞技冰雪赛道在制作过程中则采用注水器注水的方式。雪道经过人工初步翻、压达到平整后，在低温下自然冻结，然后对雪层的含水量进行测定。注水过程使用的是一种特殊的Z字型注水器，并且需要按照国际雪联的赛道含水量标准，对注水器水压进行调试。整个注水过程需要一支10-20人的团队默契配合，在统一的指挥下共同作业，使赛道的含水量达到一致，最后人为将雪推平。

两种冰雪赛道的制作过程都充满了挑战。加之北京的大陆季风性气候，冬春之交很可能出现沙尘暴、雨夹雪等极端天气，更增加了赛道制作的难度。2017年，在中国科学院院士、中国科学院冰圈科学国家重点实验室名誉主任秦大河的带领下，中国正式组建北京冬奥会赛事用雪保障关键技术研究团队，由中国科学院西北生态环境资源研究院、北京师范大学、中国气象科学研究院、哈尔滨体育学院和云顶滑雪公园等科研院校和相关滑雪行业企业协同攻关。

据介绍，造雪机造出来的雪密度通常在每立方厘米0.1克至0.4克，而冰状雪密度需要达到每立方厘米0.65克。若大于这个密度，雪就会变成冰。冰状雪的制作过程看似简单，但雪铺多少厚、注水需间隔多少时间等具体参数都需要摸索。

过去，预测赛道雪质情况依靠的是雪上巡视员的观察，耗时耗力且不够精确。经过攻关，科研团队在北京冬奥会张家口赛区云顶滑雪公园建立起密集的气象观测网络，结合雪道雪质数据等关键参数，应用雪质监测和预报技术，构建起赛道雪质等级判别模型。

北京师范大学地理学与遥感科学学院副教授殷水清说，以前赛道雪质情况预测达到公里级分辨率就很难得，现在，模型能对雪道不同位置未来72小时百米级的气象条件进行准确预报，还能模拟和预报赛道雪质随时间动态演变过程。

中国科学院西北生态环境资源研究院研究员王飞腾介绍，2019年至2021年，在北京冬奥会组委会协调下，“雪攻关团队”在黑龙江山亚力滑雪场、云顶滑雪公园和国家高山滑雪中心等场地进行冰状雪制作试验。经过成百上千次的现场试验，团队在分析大量数据的基础上，最终确定了最适合当地的冰状雪赛道制作方案。

值得一提的是，团队不仅掌握了开展不同气候条件下属地化的冰状雪赛道制作技术，还研发了冰状雪赛道专业监测设备以及高效储雪技术。他们根据不同的气象条件，结合太阳光照率等参数，在反复试验后，选出经济性和实用性最好的“土工布+泡沫塑料”方案为积



雪“盖被子”。目前，“雪攻关团队”已在首钢大跳台成功储雪5000立方米，以应对突发天气变化。

## 二氧化碳制冰 最先进最高效最环保

国家速滑馆“冰丝带”拥有亚洲最大的全冰面设计，面积达1.2万平方米。它在世界上首次应用二氧化碳跨临界直冷制冰技术，实现近零排放，成为低碳绿色运动场馆的样板工程。

除了“冰丝带”之外，首都体育馆、首体短道速滑训练馆，以及五棵松冰球训练馆，也选用了二氧化碳跨临界直冷制冰系统。这是目前世界上最先进、最环保、也是最节能的制冰技术，在冬奥会历史上尚属首次。

早在1869年，人类就建造出了用二氧化碳作为制冷剂的制冰机。20世纪40年代，“氟利昂”逐步取代了二氧化碳的制冷剂地位。近二三十年来，随着氟利昂对臭氧层的破坏被发现，二氧化碳重获青睐。“冰丝带”采用的二氧化碳就是环保性和安全性最佳、可持续性最好的自然冷媒之一，其破坏臭氧层潜能为0，全球变暖潜能为1，而且无异味、不可燃、不助燃。

众所周知，物质除了有气态、液态、固态之外，还可能在这三种状态之外的其他状态，例如：超临界态、等离子态等。二氧化碳跨临界循环是指二氧化碳气体在二氧化碳压缩机中压缩后，压力升至跨临界点压力以上，制冷循环中一部分在跨临界点以上运行，另一部分在跨临界点以下运行。与传统制冷系统比，能效可提升20%以上。

二氧化碳跨临界冰场是由二氧化碳跨临界直接蒸发式制冷制冰机组及制冷系统、冰面工艺层、板墙、浇冰车及冰车房系统、除湿系统、电气及自动化控制系统等主要部分组成。“冰丝带”中的冰面尺寸为31米×61米。制冰过程中，多台二氧化碳压缩机同时运作，冰板里制冷管道内低温二氧化碳与冰板混凝土进行换热，冰板混凝土温度逐步降到零下十几摄氏度，制冷团队不停地在冰板上洒水作业，冻成每层几毫米的冰面，经过很多次这样的工序，厚度几十

毫米的冰面才能冻结成功。

通过场馆的智能能源管理系统，场馆还能够把制冰过程产生的废热用于除湿、冰面维护、场馆生活热水等。全冰面模式下每年仅制冷部分就能节省200多万度电，相当于约120万棵树木实现的碳减排量，整个制冷系统的碳排放趋近于零。经理论分析，采用二氧化碳制冰，有把握实现冰表面温度不超过0.5℃。“冰丝带”也因此成为一座真正的智慧场馆、绿色场馆。

据介绍，制冰工艺管道设计压力高，均采用无缝不锈钢管，尤其是冰板内的制冷排管采用了单根40至50米长的无缝不锈钢盘——这种人工冰场超长不锈钢排管的应用也是国际首次。为了确保冰板制冰效果均匀，建设团队引入第三方检测团队进行管道三维激光扫描及混凝土平整度领导检测。最终，17厘米的完整混凝土地面水平高差控制在4毫米左右。

## 风速秒级显示 从“感知风”到“看见风”

雪上项目是冬奥会的重头戏，占奖牌总数的70%。由于赛场多在山地，气象条件多变，比赛中许多项目对风、温度等环境条件变化非常敏感。以跳台滑雪为例，运动员出台速度约每小时90多千米，落地速度在每小时120千米左右。整个过程中，风速、风向的变化不仅会影响运动员完成动作的表现，还会影响其安全落地，稍有不慎就可能因侧翻而受伤。

过去，冰雪运动教练员很难精确、实时得到风场信息，只能依靠风向旗来判断风向、风速，用主观经验来决策、指挥比赛，具有很大的不确定性。经过数年攻关，由中国科学院天信息创新研究院研究员、中科卫星应用德清研究院院长邵芸领衔的国家重点研发计划“科技冬奥”项目“雪上项目场地环境要素影响评估与决策辅助支持系统”，创新性地设计并实现了冰雪运动场地的精准、实时、可视化气象保障。

在北京冬奥会备战训练中，该系统服务了10支国家队，为训练和比赛提供全方位气象保障支撑和辅助决策支持协助，对抗赛场天气变化。

针对雪上项目地形复杂、气象条件多变等实际情况，微波遥感专家邵芸带领团队通过500多天跟队观测、模型构建、实验模拟、人工智能大数据分析，自主研发出了我国首套雪上项目临场指挥支持系统，填补了我国外场雪上竞技体育精准气象科技保障的技术空白。这套雪上项目临场指挥系统的研发是她长期以来对微波遥感海面风场深入研究和深刻认知的应用拓展。

▲制冰师在北京延庆国家雪车雪橇中心布置冰下景观。新华社记者 江文耀摄  
▲首钢滑雪大跳台造雪。视觉中国  
▼中国冬季两项国家队外籍射击教练学习使用“风指数”设备。



2019年8月，团队开始全力聚焦冬奥会备赛要求。在前期与国家集训队的交流沟通中，邵芸项目组得知他们最大的难点和痛点，在于“如何在100多米的区域场地实时精准地获取风速、风向数据”。经过两年多的跟队考察、改良优化，这套源于遥感技术实现从“感知风”到“看见风”的系统逐步成熟，越来越接近教练员和运动员的需求。

这套将气象观测、信息技术、竞技体育等融合为一体的系统，如何在冬奥会赛场上发挥作用？邵芸介绍，该系统可实时获取场地时间分辨率为秒级、空间分辨率为10米级的高精度测风数据，并直接换算成风指数，通过窄带数据传输系统，实时将数据送到手机、平板等智能终端，为教练员临场指挥比赛、保障运动员的生命安全提供决策辅助。

所谓“风指数”，就是风的影响指数。该系统通过运动员的体重、实时风向、风速等数据，以及风如何作用到运动员身上，计算出风指数，来协助教练员和运动员确定什么时候起跳等，从而提升竞技水平。

赛前，该系统已应用于自由式滑雪空中技巧、跳台滑雪、冬季两项、北欧两项、大跳台等雪上竞技体育项目的备战训练和冬奥会场地测试赛中，得到广泛认可。

中国冬季两项国家队外籍教练表示，“我一直梦寐以求，能够有这样一个系统，可以完整地感知整个靶场的风速风向，就如同你们这个系统。这是一个完整的训练系统，给了我们很大帮助”。北欧两项国家队外籍教练认为，“看清风”使他可以非常明确地指出运动员所犯的错误，从而提高了训练效率。实践证明，应用这套系统后，国家队运动员在训练中发生重大受伤事故的概率有效降低。

(本版文字整理/许琦敏)

## 冬奥科技面面观

### 防疫

#### 不“挑”毒株，气溶胶里测病毒

相比咽拭子等常规方式，迅速检测空气中的新冠病毒是非常大的难题。清华大学联合北京大学、中国医学科学院病原生物学研究所等单位，开发完成了公共空间生物气溶胶新冠病毒核酸监测系统。

该系统可在45分钟内自动检测出结果，且灵敏度比常规方法高出一个数量级。它可以全集成自动化，把试剂存储、流体控制、生物分子检测等步骤浓缩在芯片和配套的仪器中，无须人工干预，省时省力。实地测试结果显示，气溶胶系统的检出率是现有PCR体系的三倍。

去年下半年，生物气溶胶采样器和自动化集成高灵敏新冠病毒核酸检测系统（环境样本）两项产品已具备上市销售条件。同时，气溶胶采集的安全性也得到了证明。

据介绍，该系统在冬奥会各个比赛场馆采集的气溶胶标本，能够在4小时内将结果反馈给防疫部门。值得一提的是，这套系统不“挑”毒株，即使是最新突变的奥密克戎毒株，同样也逃不过它的“法眼”。

### 观赛

#### 5G+8K，“自由视角”随心看

不论在哪个角落，只需在5G网络环境下，手持一部5G手机，点开应用程序，自由交互式技术就可实时提供冬奥赛场的比赛画面，并实现任意视角的自由观赛，让观众“身临其境”。

直播延时30秒，画面实现1080P高清图像，与传统单独视点的视频传输相比，自由交互的多视点传输在数据容量上是数倍甚至数量级的提高。随着视点自由度的提高，瞬间传播的数据量变得巨大，分辨率要求也会随之提高。

2021年春节联欢晚会实现8K高清试播，从内容解编到信号传输实现革命式变化。北京冬奥会的自由交互式观赛则实现了另一种革命式变化——利用8K能力，在内容上提供了一个交互式自由视点的展示与观看。据介绍，摄像机将现场图像拍摄后送往云端，场馆与比赛信息经过三维重建后，再通过编码与解码提供给观众“自由视点”观看体验。

据悉，该系统还配有数字孪生推演系统，能够在随机变化的冰球比赛中计算有效的视点轨迹并合成相应内容，将比赛最精彩的镜头实时计算出来推送给观众；还能将进球轨迹以一条红线展示，运动员的姓名可直接显示于本人头顶。

### 供电

#### 助力碳中和，场馆“全绿电”

“绿色办奥”是北京冬奥会的重要理念之一，全部场馆100%使用清洁能源供电成为奥运史上的创举。距离京城270千米的“张北可再生能源柔性直流电网试验示范工程”，承担着冬奥场馆提供“绿电”的重任。

张北风电、太阳能发电资源十分丰富，距离北京负荷中心仅200—350千米，开发条件十分优越，规模高达8500万千瓦，是国家规划的大型可再生能源基地。张北柔直工程总投资125亿元，新建张北、康保、丰宁和北京4座换流站，额定电压±500千伏，额定输电能力450万千瓦，输电线路长度666千米，可大幅提升能源供给的清洁比重，为北京冬奥会提供坚强、充裕的绿色能源保障。

随机性、波动性是新能源的固有特征，大规模新能源并网是一道世界级难题。张北示范工程采用了我国原创、领先世界的柔性直流电网新技术。该技术具有可控能力强、功率调节速度快、运行方式灵活等特点，能够有效抑制交流电压波动，减少功率波动对受端电网影响，有效解决风电、光伏等间歇式电源发电并网安全问题。

该工程创下12项世界第一，有效解决张北地区绿色电力“并不上”“送不出”“难消纳”三大难题，每年可向北京输送约140亿千瓦时绿色电力，供应北京市大约1/10的用电量，全面满足北京及张家口地区26个冬奥场馆的用电需求，每年节约标煤490万吨，减排二氧化碳1280万吨。

▼张家口赛区云顶滑雪公园。