

引用格式: 方琰, Daniel Scott, Robert Steiger, 等. 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. [Fang Y, Scott D, Steiger R, et al. Impact of snow-making technology improvement on ski season length in China under climate change[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1210-1222.] DOI: 10.18402/resci.2020.06.17

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

方 琰¹, Daniel Scott², Robert Steiger³, 吴必虎⁴, 蒋依依¹

(1. 北京体育大学体育休闲与旅游学院, 北京 100084; 2. 滑铁卢大学地理与环境管理学院, 加拿大安大略 N2L3G1; 3. 因斯布鲁克大学公共财政系, 奥地利因斯布鲁克 526020; 4. 北京大学城市与环境学院旅游研究与规划中心, 北京 100871)

摘 要: 在全球气候变暖背景下, 人工造雪是滑雪场经营者有效应对气候变化的重要措施。本文假定人工造雪适宜温度由现有的 -5°C 提升到 -2°C , 基于气象站点观测数据(1981—2010年)和IPCC AR5的RCPs未来情景数据, 通过改进的SkiSim 2.0模型评估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。研究表明: ①在气候变化背景下, 人工造雪技术提升将使得中国平均滑雪季节长度增加3%~12%, 即使在2080s时期最高温室气体排放情景下(RCP 8.5), 78%的滑雪场能拥有超过100 d的滑雪季节长度; ②受气候变化影响越大的滑雪场(如华北、华东、华中), 人工造雪技术提升使其滑雪季节长度增加越多; 而人工造雪技术提升对受气候变化影响小的滑雪场(如东北、西北)作用有限; ③地理环境条件是影响滑雪季节长度的根本因素, 无论人工造雪技术是否提升, 气候变化背景下中国100 d滑雪季节长度的地理分界线均为长白山—阴山—祁连山—天山。为适应及减缓气候变化的潜在影响, 相关部门应致力于提升人工造雪技术, 从供给侧保证中国滑雪旅游产业的可持续发展。

关键词: 气候变化; 滑雪场; 技术提升; 减缓措施; SkiSim 2.0; 中国

DOI :10.18402/resci.2020.06.17

1 引言

全球气候变化不仅是重大的环境问题、能源问题, 而且还是经济问题、社会问题与政治问题, 已成为人类在21世纪面临的最复杂、最严峻的挑战之一。与1986—2005年相比, 2016—2035年全球平均地表温度预计将升高 $0.3\sim 0.7^{\circ}\text{C}$, 2081—2100年将升高 $0.3\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ ^[1]。滑雪场是滑雪旅游开展的基础, 其选址主要考量地形和气候两大因素^[2], 未来全球气候变暖对其来说是致命威胁^[3]。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第五次评估报告, 气候变暖将导致部分地区降雪减少^[1], 自然积雪覆盖降低^[4]。此外, 由于人工造雪依赖一定的温度和湿度^[5], 气候

变化将通过影响人工造雪进一步影响滑雪场积雪状况。随着全球气温不断上升, 气候变化对滑雪场和滑雪需求影响的研究在2008—2017年快速增长, 研究区域涵盖欧洲、北美、亚洲及冬奥会举办地等, 成为旅游领域学术界和产业界的一大热点问题^[6]。

随着2022年冬奥会的推进以及国家层面利好政策的持续推出, 中国滑雪场数量近年来快速增长。2018年, 中国滑雪场数量达742个, 滑雪人次为1970万^[7]。虽然中国滑雪场数量已位列世界第一, 但符合国际标准要求的高质量滑雪场不到中国滑雪场总数的10%^[8]。与国外滑雪场相比, 中国滑雪场自然积雪条件较差, 人工造雪依赖程度高。目前

收稿日期: 2019-07-25; 修订日期: 2020-01-16

基金项目: 北京体育大学自主课题(校2020027); 北京体育大学高层次人才科研启动项目“中国冰雪运动与文化旅游产业协同路径研究”。

作者简介: 方琰, 女, 江西上饶人, 师资博士后, 博士, 主要从事气候变化与旅游、冰雪产业研究。E-mail: yanfang113@126.com

通讯作者: 吴必虎, 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事区域旅规划研究。E-mail: tigerwu@urban.pku.edu.cn

2020年6月

中国所有滑雪场的占地面积约为 3080 hm², 其中 99% 的滑雪面积需要造雪机和压雪机^[9]。从滑雪季节长度来看, 若仅依赖自然降雪, 98% 滑雪场的滑雪季节长度低于 59 d; 若结合人工造雪, 78% 滑雪场的滑雪季节长度可超过 100 d^[10]。在未来气候变化背景下, 中国不同区域滑雪场的滑雪季节长度均呈现缩短趋势, 2050s 时期 RCP4.5 排放情景下滑雪季节长度缩短比例为 5%~61%^[11], 中国滑雪场如何有效应对及减缓气候变化的潜在影响是滑雪旅游可持续发展面临的重要挑战之一。

人工造雪作为减缓气候变化对滑雪场影响的主要措施, 对降低滑雪场在气候变化背景下的脆弱性和敏感性具有重要作用。例如, 在温度上升 3℃ 且降水减少 20% 的情景下, 澳大利亚将无法拥有可靠自然积雪的滑雪场^[12], 如果有完善的人工造雪设备及供水系统, 所有滑雪场将能在未来 25 年有效应对气候变化的潜在影响^[13]。由于中国滑雪场现有的人工造雪量已较大, 仅通过增加人工造雪时间和造雪机数量应对气候变化作用有限且运营成本高, 主要应对措施应为提升人工造雪技术, 即造雪机能在更高的温度下实现人工造雪, 同时降低水资源和能源消耗。具体而言, 人工造雪技术提升主要通过增加适宜人工造雪的时间, 从而提高人工造雪量, 增加滑雪场的滑雪季节长度, 即人工造雪技术通过改变气候变化背景下人工造雪能力而引起滑雪季节长度变化。人工造雪能力是根据滑雪场雪道海拔高度分布模拟的人工造雪量加权平均值, 代表特定人工造雪技术条件下整个滑雪场人工造雪量的平均水平^[14]。滑雪季节长度是指每个雪季积雪深度 (包括自然降雪和人工造雪) ≥ 30 cm 的可滑雪天数^[15], 是衡量气候变化对滑雪场影响的重要测度指标。现有研究评估气候变化对滑雪场影响的其他测度指标均与滑雪季节长度相关, 如人工造雪需求量 (维持 100 d 滑雪季节长度或者保证滑雪场在圣诞假期至三月底能持续营业)、经济可持续发展能力 (能维持至少 100 d 的可滑雪天数; 圣诞至新年假期的营业天数比例 > 70% 或 75%)。

在全球气候变化背景下, 人工造雪技术提升对减缓气候变化对中国滑雪场潜在影响的作用大小, 且未来不同时期 (短期、中期、长期) 人工造雪技术

需提升到何种程度才能有效应对气候变化等关键问题亟待解决。因此, 本文基于日值气象观测数据 (1981—2010 年) 和 IPCC 第五次评估最新发布的未来中高排放情景数据 (RCP4.5、RCP8.5), 基于改进的 SkiSim 2.0 模型评估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, 以明确技术提升对中国滑雪场减缓气候变化潜在影响的作用, 为其有效应对未来气候变化提供科学依据, 从供给侧保证中国滑雪旅游的可持续发展。

2 模型构建与数据来源

2.1 SkiSim 2.0 模型构建

SkiSim 1.0 模型最初由 Scott 等^[15] 基于安大略省滑雪市场构建, 包括自然积雪模块、人工造雪模块和运营条件, 用以评估气候变化对滑雪场的影响, 测度指标有滑雪季节长度、人工造雪需求量、可滑雪面积等。Steiger^[14] 以欧洲阿尔卑斯山地区为研究区域, 通过改进人工造雪规则进一步发展了该模型 (SkiSim 2.0)。目前, SkiSim 2.0 模型已经成功运用于奥地利、意大利、美国、德国、瑞士、挪威和加拿大等国家以及欧洲阿尔卑斯、北美、冬奥会举办地等区域^[16-19]。

SkiSim 2.0 模型主要计算雪水当量, 该变量是指当积雪完全融化后所得到的水形成水层的垂直深度。自然积雪模块中每日雪水当量的计算公式如下:

$$SWE_{\text{pack}} = SWE_{\text{pack}(d-1)} + SWE_s - M \quad (1)$$

式中: $SWE_{\text{pack}(d-1)}$ 是前一天的雪水当量; SWE_s 是新降雪的雪水当量 (式(2)); M 为实际积雪融化量 (式(3))。

$$SWE_s = p \times \frac{T_{c, \max} - T_{\text{mean}}}{T_{c, \max} - T_{c, \min}} \quad (2)$$

式中: p 为降水量; $T_{c, \max}$, $T_{c, \min}$ 为降雪和降水形式转换的临界温度阈值 ($T_{c, \max} > T_{c, \min}$), 这 2 个参数通过气象站点的降雪数据进行校准; T_{mean} 为平均气温。如果 $T_{\text{mean}} < T_{c, \min}$, 则降水量为降雪量; 如果 $T_{\text{mean}} > T_{c, \max}$, 则降水量为降雨量; 若平均温度介于两个临界值之间, 降雨/降雪量则通过线性插值计算。

积雪融化量是影响积雪的重要指标, 由于雪层

温度和平均气温之间的差异,会导致积雪融化延迟。因此,计算积雪融化量时,需区分可能的融化量和实际的积雪融化量。实际积雪融化量的计算公式如下:

$$M = ddf \times T_{\text{mean}} - \frac{SWE \times T_{\text{pack}}}{160} \quad (3)$$

式中: T_{mean} 为平均气温; ddf 为度日因子; T_{pack} 是雪层温度; SWE 为雪水当量。其中,度日因子(ddf)反映了单位正积温产生的冰雪消融量。由于积雪融化量将随着积雪质量及入射辐射变化而变化,因此该模型使用变动的度日因子。度日因子的取值范围(最大值和最小值)通过积雪天数($SWE \geq 5 \text{ mm}$)的方差进行校准。

在人工造雪模块中,SkiSim 2.0通过技术限制(温度阈值和容量)和雪层密度来模拟雪道维护,从而明确人工造雪的相关决策。人工造雪时期根据实际运营情况确定,其他时期人工造雪模块设置为不运行。人工造雪所需温度满足时便可进行造雪,在积雪深度达30 cm后便停止造雪。该规则代表“基础造雪”,适用于所有海拔带,目标是为了有足够的积雪深度保证滑雪场按时营业。在“基础造雪”完成后,开始进行“改善造雪”,确保滑雪场的持续营业,直到滑雪季结束。具体而言,每小时造雪量通过在 T_{min} 和 T_{max} 之间线性插值计算。人工造雪的雪水当量计算公式如下:

$$SWE_{\text{sm}} = \frac{T_{\text{min}} - T_{\text{crit}}}{(T_{\text{min}} - T_{\text{max}})/24} \times \frac{SM_{\text{cap}}}{24} \quad (4)$$

式中: T_{max} 、 T_{min} 分别为最低和最高气温; T_{crit} 是人工造雪所需气温; SM_{cap} 为人工造雪量。

为使该模型适用于中国,对其主要参数进行调整优化。在自然积雪模块中,本文首先对度日因子进行调整修正。度日因子反映了单位正积温产生的冰雪消融量^[20],其空间变化特征直接影响冰雪融化建模的准确性^[21,22]。根据中国滑雪场的空间分布和相关文献资料(表1),本研究将度日因子参数设定为4~8 $\text{mm} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

同时,基于相关文献确定中国固液态降水分离的临界气温值(表2),并基于每个站点的积雪深度对其进行校准,最终将降水形态的临界气温值设定为1°C和3°C。若温度低于1°C,降水将100%为降雪;若温度高于3°C,降水则100%为降雨;若温度在1~3°C之间,降水分别转换为降雨和降雪的比例则通过线性插值计算。

人工造雪模块中,依据相关文献和访谈信息设定相关参数(表3)。访谈的6名对象涵盖滑雪产业投资者、不同区域滑雪场经理、中国奥组委顾问(冰雪体育赛事),其中滑雪场运营者从事滑雪产业时间均在15年以上,拥有丰富从业经验。访谈大纲主要包括访谈对象的个人基本信息和相关从业经历、中国滑雪场发展情况、滑雪场运营(如进行滑雪活动的合适积雪深度、滑雪季开业及停业时间、人工造雪所需温度等)、气候变化感知和暖冬对滑雪场影响5个方面。

表1 中国区域的度日因子

Table 1 Degree-day factors in China

度日因子/($\text{mm} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	区域	文献
1.4~6.9	中国东北(洮儿河流域)	尹雄锐等 ^[23]
3.1	乌鲁木齐河源1号冰川	刘时银等 ^[24]
3.4	天山(琼台兰冰川)	张勇等 ^[22]
5.9	横断山	
8.5	唐古拉山(冬克玛底冰川)	谯程骏等 ^[25]
5.3	扎当冰川	吴倩如等 ^[26]
1.7	河西内陆河流域(石羊河)	高鑫等 ^[27]
4.0	河西内陆河流域(黑河)	
2.4	河西内陆河流域(北大河)	
3.4	河西内陆河流域(疏勒河)	
4.1	河西内陆河流域(党河)	

2020年6月

表2 中国固液态降水分离的临界气温值

Table 2 Temperature for separating solid and liquid precipitations in China

气温/℃	区域	文献
1.9~6.0	中国	韩春坛等 ^[28]
1.0~7.8	中国	Chen 等 ^[29]
0.0~2.0	长江源区	刘俊峰等 ^[30]
0.0~3.0	三江源区	冯曦等 ^[31]
0.0 (1000 hPa)	北京	张琳娜等 ^[32]
-4.0 (850 hPa)		
1.9~5.7	天山	张雪婷等 ^[33]

(1)滑雪所需的积雪深度设置为30 cm。研究表明,积雪厚度至少达到30 cm才能保证滑雪者的安全^[15,34]。通过对中国不同区域和类型的滑雪场运营者和管理者进行深度访谈,进一步确定了30 cm这个标准。

(2)人工造雪时期设定为11月1日—4月1日。通过对中国不同区域和类型的滑雪场运营者和管理者深度访谈得知,中国滑雪场对人工造雪的依赖程度高,人工造雪在滑雪场试营业前便开始,主要在11月初期。同时,根据积雪厚度和温度情况(是否适合人工造雪),在整个滑雪季随时增补人工造雪。通过网络搜集得到本文116个滑雪场的滑雪季节长度(试营业和停止营业公告),确定了中国滑雪场的人工造雪时期为11月1日—4月1日。需指出的是,中国大部分滑雪场在3月中下旬停止营业,但部分较为优质的滑雪场可持续到4月,因此本文将人工造雪的结束时期设定为4月1日。

(3)人工造雪适宜温度设定为-5℃(现有的人工造雪技术)和-2℃(未来可能提升的人工造雪技术)。目前,中国滑雪场主要依赖进口造雪机。例如,2016年中国所有滑雪场的造雪机总数约为4000台,其中进口造雪机数量约为3500台,国产造雪机数量

仅为500台。基于此,本文参照现有国外人工造雪设备所需温度^[5],并通过对滑雪场经营者和管理者的深度访谈,验证及调整该参数的设定,最终将中国人工造雪适宜温度设定在-5℃(现有的人工造雪技术)和-2℃(未来可能提升的人工造雪技术)。

(4)人工造雪量为10 cm/d。通过对中国滑雪场经营者/管理者进行访谈得知,根据造雪机的说明书,每台造雪机理想造雪量约2.6 cm/h,但这个造雪量仅在-10℃左右能够实现。通过借鉴相关文献^[14],基于本文设定的人工造雪适宜温度、每台造雪机每小时人工造雪量和适宜人工造雪时间,将人工造雪能力设定为10 cm/d。

通过改进的SkiSim 2.0模型得到116个滑雪场的现有滑雪季节长度模拟值(图1)。利用决定系数 R^2 评定模型模拟输出效果,滑雪季节长度模拟值与观测值的相关系数 $R^2=0.643$ ($P<0.001$),表明两者具有较好的一致性,即改进的SkiSim 2.0模型能够较好地模拟中国滑雪场滑雪季节长度情况。需指出的是,北京滑雪场的模拟值(即基准线)低于实际滑雪季节长度(经实地调研得知北京滑雪场的滑雪季节长度为100 d左右),而其他区域的模拟值与实际滑雪季节长度接近。为不影响模型的整体拟合度,便不再对模型参数进行调整修改。

2.2 数据来源

2018年,中国已建有742个滑雪场(包括26个室内滑雪场)^[7]。在日趋激烈的滑雪旅游产业竞争中,由于投资及自然资源的因素,小型滑雪场极易被淘汰。同时,室内滑雪场受气候变化影响较小。因此,本文基于滑雪场运载能力(索道类型及数量)和邻近气象站点数据的连续性和完整性,最终选取中国116个质量较高的室外滑雪场进行研究。根据邻近原则,116个滑雪场气象数据来源于65个气象

表3 中国滑雪场的相关参数设置

Table 3 Parameter setting of Chinese ski resorts

参数	设置	资料来源
滑雪所需的积雪深度(包括自然降雪和人工造雪)	30 cm	访谈;Scott等 ^[15] ;Abegg等 ^[34]
人工造雪时期	11月1日—次年4月1日	访谈;网络资料 [®]
人工造雪适宜温度	-5℃(现有)/-2℃(提高)	访谈;Snowathome ^[5]
人工造雪量	10 cm/d	访谈;Steiger ^[14]

注:®本文选取的116个滑雪场的现有滑雪季节长度是根据滑雪季试营业日期和停业公告日期计算得出。

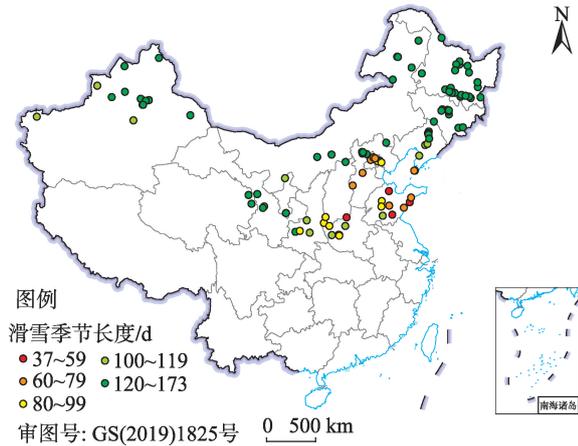


图1 中国主要滑雪场的现有滑雪季节长度模拟值

Figure 1 Current ski season length of ski areas in China

站点(图2),选取的日值气象观测数据(1981—2010年)为日最高气温、日最低气温和日降水量。需指出的是,每个滑雪场的气象数据根据其海拔高度作了相应调整(即海拔每增加100 m,气温降低0.6℃,降水增加3%),通过SkiSim 2.0模型完成。

逐日积雪深度数据来源于中国雪深长时间序列数据集(1979—2016年),由寒区旱区科学数据中心(<http://data.casnw.net/portal/>)提供^[35-37],利用ArcGIS将积雪深度数据的原始ASCII源文件转化成栅格数据,并统一转换为Albers投影,通过与滑雪场匹配的气象站点的经纬度获取1981—2010年逐日积雪深度。未来气候变化数据选取IPCC第五次评估报告的国际耦合模式比较计划第五阶段数据

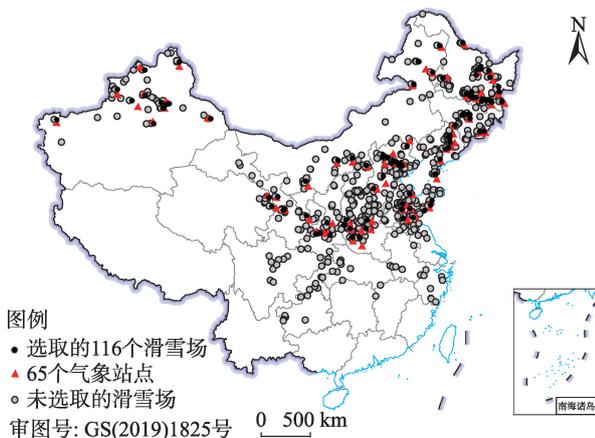


图2 本文选取的滑雪场及与其匹配的气象站点
空间地理位置

Figure 2 Spatial distribution and location of selected ski resorts and weather stations in the study

(CMIP 5),采用不同国家提供的15个模式的试验结果均值分析未来气候变化情况(CNRM-CM5、CSIRO-Mk3-6-0、CanESM2、GFDL-CM3、GISS-E2-H、GISS-E2-R、HadGEM2-AO、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM、MIROC-ESM、MIROC5、MPIESM-LR、MPI-ESM-MR、MRI-CGCM3、NorESM1-M),包含1981—2010年历史气候模拟(historical)和2020s(2011—2040年)、2050s(2041—2070年)、2080s(2071—2100年)未来气候变化预估数据。由于最低温室气体排放情景下(RCP 2.6)气候变化对中国滑雪场的影响甚微^[10],因此选择RCP 4.5和RCP 8.5两个典型浓度路径进行分析。通过随机天气发生器(LARSWG)^[38,39]将各气候模拟数据统一插值到观测站点上。

3 结果与分析

3.1 人工造雪技术提升对气候变化背景下人工造雪能力的影响

在未来气候变化背景下,中国不同省份人工造雪能力将受到不同程度的影响。基于现有的人工造雪技术(图3),西北和东北的人工造雪能力将呈现不同程度的提升,其中黑龙江、吉林、青海、新疆的人工造雪能力将大幅提高;而甘肃、辽宁、宁夏呈小幅度增加。然而,气候变化对华中和华东的人工造雪能力造成严重的负面影响,使其人工造雪能力大幅下降。同时,华北不同省份人工造雪能力受气候变化影响存在显著差异。例如,北京和山西的人工造雪能力明显下降,而河北和内蒙古呈现小幅度增加趋势。不同区域人工造雪能力对于气候变化产生不同响应的结果,主要原因在于适宜人工造雪时间的变化,即基于现有的人工造雪技术(-5℃),未来全球气候变暖将使得西北和东北等区域适宜人工造雪的时间延长,而华东、华中和华北大部分地区适宜人工造雪的时间减少。

与现有的人工造雪技术相比,人工造雪技术提升将使得中国所有区域滑雪场的人工造雪能力提高(图4),但对不同区域的作用大小不同。对于气候变化背景下人工造雪能力下降的区域而言,提升的人工造雪技术能有效缓解气候变化对其人工造雪能力造成的负面影响;而对于气候变化背景下人工造雪能力提高的区域而言,人工造雪技术革新对其

2020年6月

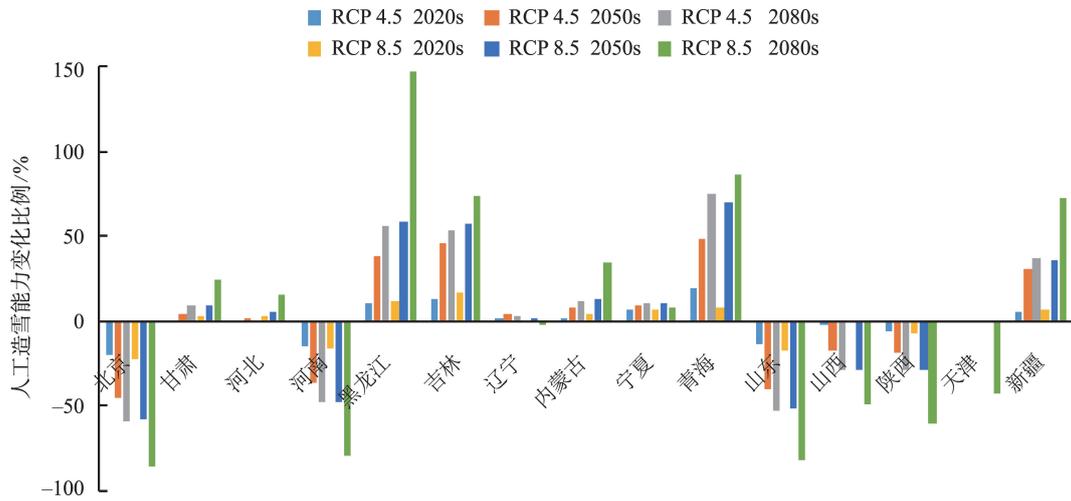


图3 气候变化对中国主要省份人工造雪能力的影响(现有技术)

Figure 3 Projected changes in technically produced snow (current snowmaking technology)

人工造雪能力进一步提升的作用较小。例如,人工造雪技术提升使气候变化背景下,北京、山东、河南的人工造雪能力大幅度提升,而对西北和东北的人工造雪能力的影响较小。主要原因在于人工造雪适宜温度提升 3°C (由 -5°C 提升至 -2°C)将使得华东、华中和华北等区域适宜人工造雪的时间大幅度增加,而对东北、西北等区域适宜人工造雪时间的影响较小。

3.2 人工造雪技术提升对气候变化背景下滑雪季节长度的影响

若人工造雪技术提升,中国主要省份的滑雪季

节长度在未来不同时段和排放情景下都将增加。从滑雪天数减少比例来看(表4),在大部分时期和情景下,人工造雪技术提升使得高敏感性区域的滑雪季节减少比例降低一半以上,如北京、河南、山东。然而,在2080s时期的高排放情景下(RCP 8.5),人工造雪技术提升对滑雪季节长度增加作用较小。以北京为例,即使人工造雪技术提升,其滑雪季节长度减少比例仍高达86%。

从增加天数来看(表5),人工造雪技术提升对敏感性高的滑雪场更为重要,如北京、山东、河南滑雪季节长度最多可增加47、41和42 d;而敏感性低

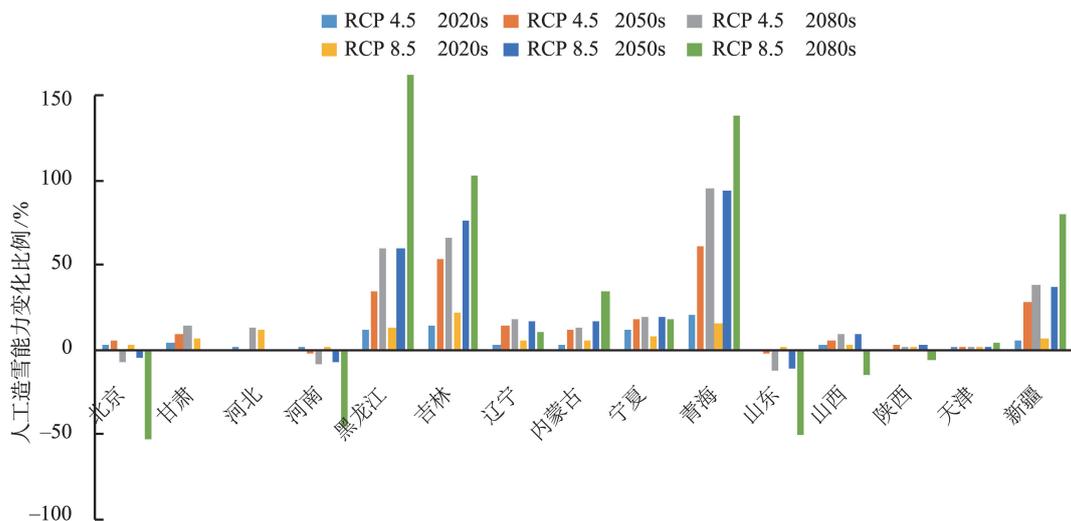


图4 气候变化对中国主要省份人工造雪能力的影响(提升技术)

Figure 4 Projected changes in technically produced snow (improved snowmaking technology)

表4 中国主要省份滑雪季节长度变化比例

Table 4 Projected changes in ski season length under different climate change scenarios

(%)

区域	省份	RCP 4.5						RCP 8.5					
		2020s		2050s		2080s		2020s		2050s		2080s	
		现有技术	提升技术	现有技术	提升技术	现有技术	提升技术	现有技术	提升技术	现有技术	提升技术	现有技术	提升技术
华北	北京	-19	-7	-61	-21	-80	-39	-22	-8	-79	-37	-97	-86
	山西	-8	-4	-23	-11	-40	-16	-8	-5	-40	-17	-68	-54
	天津	-5	-4	-14	-10	-22	-15	-6	-5	-23	-16	-64	-35
	内蒙古	-1	-1	-4	-4	-6	-6	-1	0	-6	-6	-13	-12
	河北	-7	-3	-15	-7	-20	-13	-7	-2	-19	-13	-31	-27
东北	黑龙江	-1	-1	-4	-3	-5	-4	-2	-1	-6	-5	-10	-8
	吉林	-2	-1	-5	-3	-9	-6	-2	-1	-9	-5	-17	-14
	辽宁	-4	-4	-13	-10	-19	-13	-6	-5	-19	-14	-33	-32
西北	新疆	-2	-2	-5	-4	-7	-6	-2	-2	-8	-6	-16	-13
	甘肃	-5	-3	-9	-8	-13	-12	-4	-3	-13	-11	-25	-22
	宁夏	-3	-3	-10	-10	-14	-14	-3	-4	-14	-14	-30	-25
	青海	-1	-1	-5	-4	-8	-6	-6	-2	-8	-6	-21	-17
	陕西	-8	-5	-23	-11	-34	-17	-9	-6	-36	-17	-65	-41
华东	山东	-18	-7	-54	-23	-76	-39	-23	-7	-75	-38	-95	-85
华中	河南	-21	-8	-51	-20	-66	-33	-22	-8	-68	-35	-92	-75

的省份,滑雪季节长度增加较少。以黑龙江为例,人工造雪技术的提升仅能使其滑雪季节长度增加3~6 d。

基于滑雪场尺度,图5和图6分别展示了中等

温室气体排放情景(RCP 4.5)和最高温室气体排放情景(RCP 8.5)下现有和提升人工造雪技术的中国滑雪季节长度对比。由图5a可知,在RCP 4.5中排放情景下,若人工造雪技术不提高,2020s时期山

表5 人工造雪技术提升使中国主要省份滑雪季节长度增加的情况

Table 5 Increase in ski season length with improved snowmaking technology

(d)

区域	省份	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
华北	北京	29	47	45	31	46	12
	山西	13	22	34	13	33	20
	天津	8	11	15	9	15	35
	内蒙古	4	5	5	6	5	7
	河北	15	20	17	15	17	12
东北	黑龙江	4	4	5	4	4	6
	吉林	5	7	7	5	9	8
	辽宁	11	14	16	12	16	10
西北	新疆	5	6	7	5	7	8
	甘肃	10	10	9	10	10	11
	宁夏	11	11	10	11	11	15
	青海	5	7	8	6	8	10
	陕西	13	23	29	14	31	34
华东	山东	32	41	41	34	41	11
华中	河南	32	42	41	32	41	19

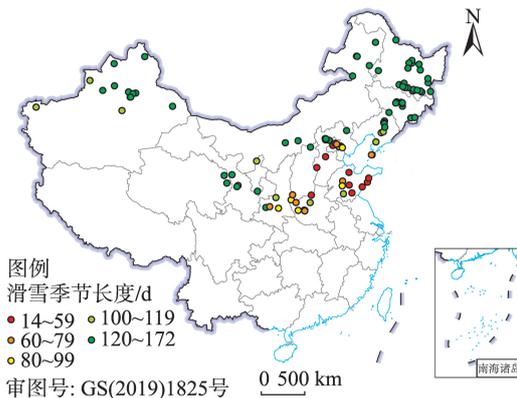
2020年6月

东、北京和河北等地区部分滑雪场滑雪季节长度将低于60 d;至2050s时期,滑雪季节长度低于60 d的滑雪场数量增多,波及的省份增加,如山西和陕西省(图5c);2080s时期,虽然滑雪季节长度低于60 d的滑雪场分布格局没有变化,但滑雪季节长度低于100 d的滑雪场数量明显增多,主要是新疆省(图5e)。若人工造雪技术提升,2020s时期滑雪季节长度高于80 d的滑雪场数量高达98%(图5b);山东、

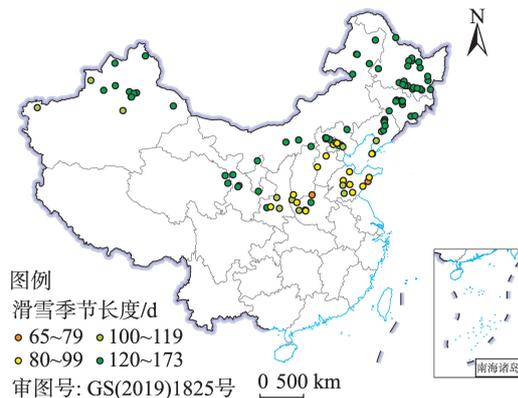
北京和河北等地区大部分滑雪场的滑雪季节长度在2050s时期依旧能保持60 d以上(图5d);至2080s时期,滑雪季节长度低于60 d的滑雪场数量相对较少,仅占总数的9%(图5f)。

RCP 8.5 高排放情景下的气候变化对中国滑雪场滑雪季节长度造成的负面影响更大(图6)。由图6a可知,若维持现有人工造雪技术,2020s时期山东、北京和河北等地区大部分滑雪场滑雪季节长度

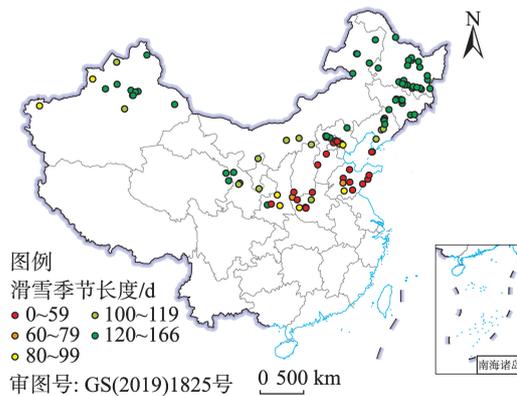
a. RCP 4.5 2020s (现有技术)



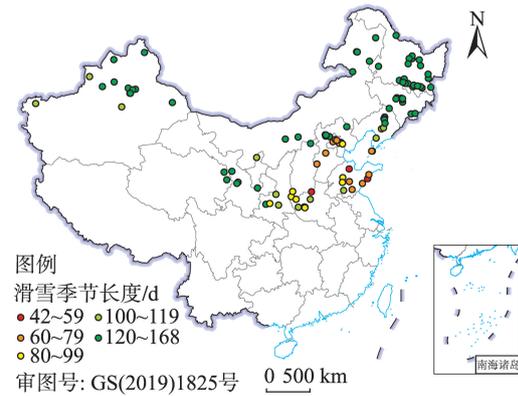
b. RCP 4.5 2020s (提升技术)



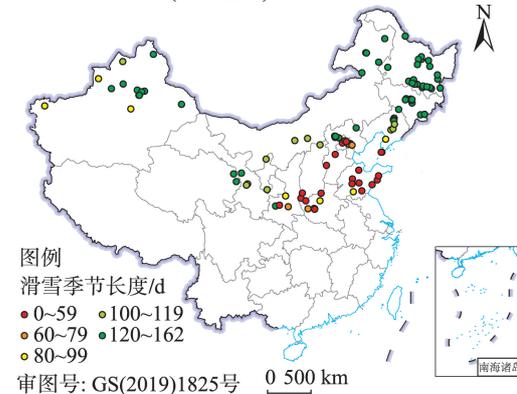
c. RCP 4.5 2050s (现有技术)



d. RCP 4.5 2050s (提升技术)



e. RCP 4.5 2080s (现有技术)



f. RCP 4.5 2080s (提升技术)

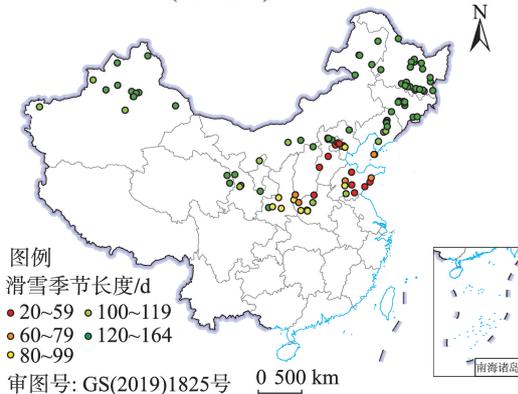


图5 RCP 4.5气候变化情景下人工造雪技术提升对中国主要滑雪场滑雪季节长度的影响

Figure 5 Impact of snow-making technology improvement on ski season length of ski areas in China under RCP 4.5

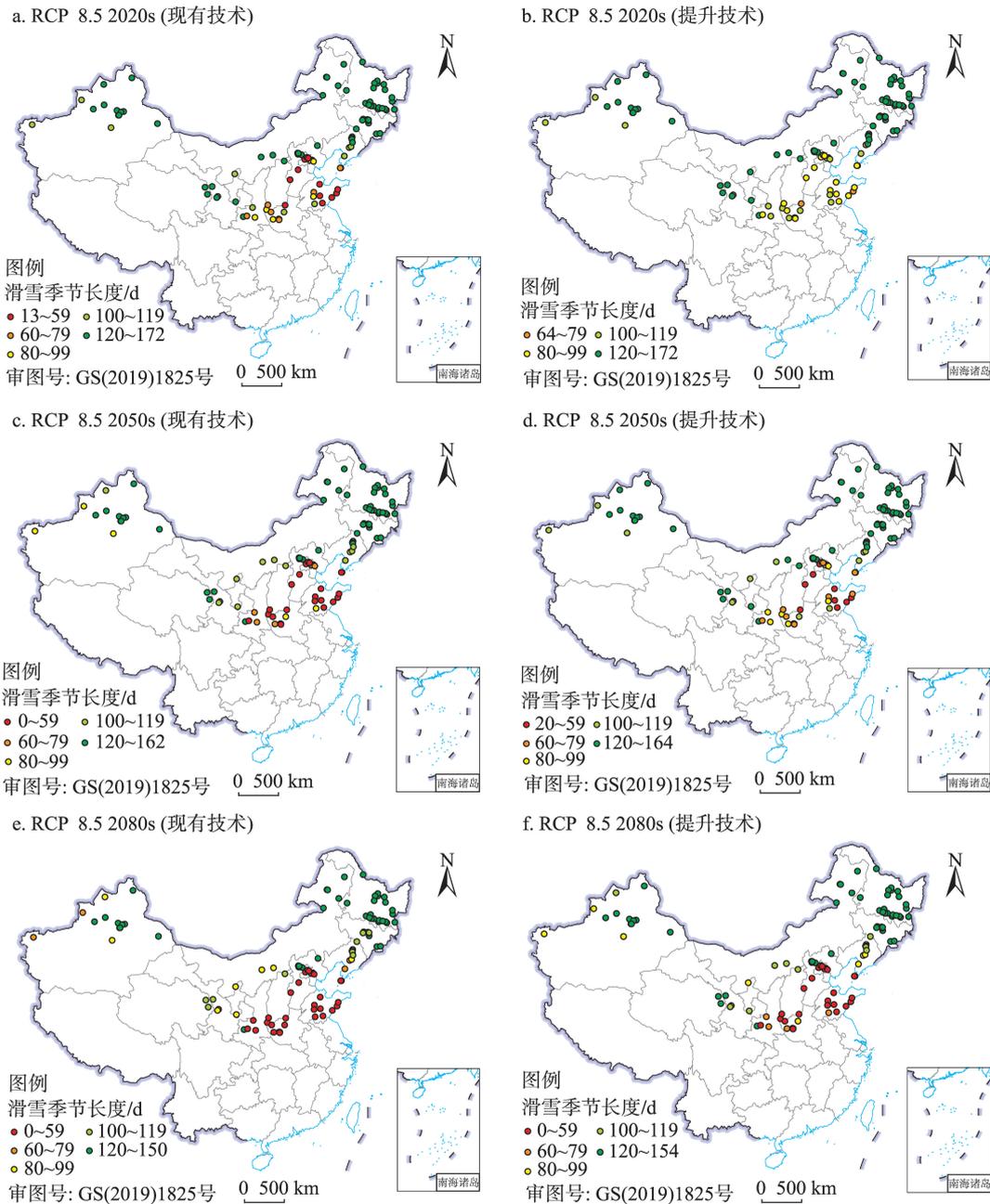


图6 RCP 8.5气候变化情景下人工造雪技术提升对中国主要滑雪场滑雪季节长度的影响

Figure 6 Impact of snow-making technology improvement on ski season length of ski areas in China under RCP 8.5

将低于 60 d; 在 2050s 时期, 河南、山西等省滑雪季节长度低于 60 d 的滑雪场数量明显增加, 且新疆部分滑雪场滑雪季节长度低于 100 d (图 6c); 至 2080s 时期, 虽然黑龙江和吉林的滑雪季节长度仍能保持在 120 d 以上, 但其他区域滑雪场滑雪季节长度明显缩短, 尤其是西北地区 (图 6e)。若人工造雪技术提升, 2020s 时期所有滑雪场的滑雪季节长度将高于 65 d (图 6b); 至 2050s 时期, 滑雪季节长度低于

60 d 的滑雪场数量仅占总数的 9%, 新疆所有滑雪场滑雪季节长度将高于 100 d (图 6d); 东北所有滑雪场滑雪季节长度在 2080s 时期能维持在 120 d 以上, 且西北大部分滑雪场滑雪季节长度高于 80 d (图 6f)。

图 5 和图 6 的结果表明, 提升的人工造雪技术在不同温室气体排放情景和不同时期将增加所有滑雪场的滑雪季节长度, 尤其是受气候变化影响较

2020年6月

大的滑雪场。例如,在RCP 4.5中排放情景下,若维持现有人工造雪技术,2050s时期西北部分滑雪场的滑雪季节长度将低于100d(如新疆);而提升的人工造雪技术将使得黄河以北地区滑雪场的滑雪季节长度即使在2080s时期仍高于100 d(图5)。在RCP 8.5高排放情景下,若人工造雪技术未提升,2020s时期华北和华中区域部分滑雪场的滑雪季节长度将低于60 d;而人工造雪技术提升将使得同时期所有滑雪场的滑雪季节长度均高于65 d(图6)。相比而言,提升的人工造雪技术对受气候变化影响较小的滑雪场作用甚微。例如,无论人工造雪技术是否提升,东北大部分滑雪场滑雪季节长度都能维持在120 d以上。

此外,通过对比现有和提升人工造雪技术水平下中国滑雪季节长度分布情况可知,不同温室气体排放情景下人工造雪技术的提升并没有改变中国滑雪场滑雪季节长度的分布格局(图5,图6)。未来滑雪季节长度低于60 d的滑雪场仍然主要位于北京、山东等地区,而滑雪季节长度能维持100 d以上的滑雪场主要分布在东北和新疆。无论人工造雪技术是否提升,中国滑雪季节长度的重要地理分界线始终为长白山—阴山—祁连山—天山,该线北部的滑雪季节长度均大于120 d,而该线南部的滑雪季节长度大部分低于100 d。主要原因在于滑雪季节长度根本上仍取决于地理环境条件,这也是滑雪场选址和建设的基本前提。研究表明,无论是政府对产业要素的调控,还是市场对产业要素的配置,滑雪场依旧受控于冰雪、气候、地形等自然因素^[8]。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以人工造雪能力和滑雪季节长度为测度指标,探讨人工造雪技术提升对滑雪场减缓气候变化潜在影响的作用。主要结论为:

(1)人工造雪技术提升对于中国滑雪场应对未来气候变化影响至关重要。具体而言,人工造雪技术提升将使得中国所有区域滑雪场的气候敏感性在未来不同时段和不同温室气体排放情景下均降低,中国平均滑雪季节长度将增加3%~12%;即使在2080s时期的最高温室气体排放情景下(RCP 8.5),人工造雪技术提升使得中国78%的滑雪场拥有100

d以上的滑雪季节长度,比现有人工造雪技术水平增加12%。

(2)人工造雪技术提升对中国不同区域滑雪场的作用程度不同。受气候变化影响越大的滑雪场,人工造雪技术提升对其作用越大;受气候变化影响小的滑雪场,人工造雪技术提升对其作用甚微。如北京、山东、河南的可滑雪天数最多可增加47、41和42 d;而东北和新疆的滑雪场受气候变化影响较小,人工造雪技术提升对其作用有限,如黑龙江的滑雪季节长度仅增加3~6 d。

(3)虽然人工造雪技术对中国滑雪场缓解气候变化的潜在影响具有积极作用,但滑雪场滑雪季节长度仍主要由自然因素决定(如气候、地形等)。无论人工造雪技术是否提升,中国滑雪季节长度地理分界线始终为长白山—阴山—祁连山—天山,该线北部的滑雪季节长度均大于120 d,而该线南部的滑雪季节长度大部分低于100 d。

4.2 讨论

与传统/成熟滑雪目的地相比,中国滑雪场依赖人工造雪程度较高。在气候变化背景下,虽然人工造雪技术提升使得北美自然积雪依赖型滑雪场(如加拿大安大略省)滑雪季节长度增加幅度与中国整体平均水平接近^[10],但技术革新对中国不同区域滑雪场的作用差异明显高于国外滑雪目的地。一方面在于中国气候复杂,气候变化及其影响的区域差异显著^[40];另一方面在于中国滑雪场之间自然积雪条件差异大,因此中国滑雪场对人工造雪技术提升的依赖性更强。同时,人工造雪技术的不断革新是中国滑雪场可持续发展的必要条件,尤其是对于自然积雪条件相对欠缺区域的滑雪场而言(如华北、华东、华中)。即使未来人工造雪适宜温度提升到-2℃,中国6个省份的滑雪季节长度在2080s时期的高排放情景下(RCP 8.5)减少比例仍高达35%~86%。此外,人工造雪具有耗水多、耗电大、噪音大和地面结冰不易融化等特点,对生态环境造成较大的负面影响。在气候变化背景下,相关部门应致力于提升人工造雪技术,使其能够在尽量减少对水资源和环境影响的前提下,在较高温度下实现造雪,从而降低人工造雪的资金投入和能源消耗。

本文初步探讨人工造雪技术提升对中国滑雪

场减缓气候变化潜在影响的作用,尚存在一些不足之处。其一,人工造雪技术提升情景仅限定为 -2°C ,未考虑未来技术不断革新的情况,如适宜人工造雪的气温升至 0°C ;其二,由于无法结合未来滑雪场应对气候变化的相应策略(如通过减少开放的雪道维持滑雪场营业),评价结果可能会高估气候变化对滑雪季节长度的影响^[41]。最后,本文聚焦滑雪场的主要测度指标——滑雪季节长度,未做延伸性探究,如基于该指标评估人工造雪技术提升对滑雪场盈利能力的作用。这些不足都有待在后续研究中不断完善和提高。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 韩杰, 韩丁. 中外滑雪旅游的比较研究[J]. 人文地理, 2010, 16(3): 26-30. [Han J, Han D. Comparative study of ski tourism at home and abroad[J]. Human Geography, 2010, 16(3): 26-30.]
- [3] Steiger R. Scenarios for skiing tourism in Austria: Integrating demographics with an analysis of climate change[J]. Journal of Sustainable Tourism, 2012, 20(6): 867-882.
- [4] Elsasser H, Bürki R. Climate change as a threat to tourism in the Alps[J]. Climate Research, 2002, 20(3): 253-257.
- [5] Snowathome.com. Wet- Bulb Temperature Chart: Snowmaking Weather Tools[EB/OL]. (2013- 12) [2019- 07- 25]. www.snowathome.com/pdf/wet_bulb_chart_celsius.pdf.
- [6] Steiger R, Scott D, Abegg B, et al. A critical review of climate change risk for ski tourism[J]. Current Issues in Tourism, 2019, 22(11): 1343-1379.
- [7] 伍斌, 魏庆华. 中国滑雪产业白皮书(2018年度报告)[EB/OL]. (2019- 01- 17) [2019- 07- 25]. http://www.8264.com/wenzhang/5524759.html. [Wu B, Wei Q H. China Ski Industry White Book (2018 Annual Report)[EB/OL]. (2019-01-17) [2019-07-25]. http://www.8264.com/wenzhang/5524759.html.]
- [8] 王世金, 徐新武, 邓婕, 等. 中国滑雪旅游目的地空间格局、存在问题及其发展对策[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 902-909. [Wang S J, Xu X W, Deng J, et al. Chinese skiing-tourism destination: Spatial patterns, existing problems and development countermeasures[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 902-909.]
- [9] 孙承华, 伍斌, 魏庆华, 等. 中国滑雪产业发展报告(2016)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2016. [Sun C H, Wu B, Wei Q H, et al. China Ski Industry Development Report (2016) [M]. Beijing: Social Science Academic Press, 2016.]
- [10] 方璇. 气候变化对中国滑雪场及滑雪旅游需求的潜在影响研究[D]. 北京: 北京大学, 2019. [Fang Y. Potential Effects of Climate Change on China's Ski Resorts and Ski Demand[D]. Beijing: Peking University, 2019.]
- [11] Fang Y, Scott D, Steiger R. The impact of climate change on ski resorts in China[J]. International Journal of Biometeorology, 2019, DOI: 10. 1007/s00484-019-01822-x.
- [12] König U. Tourism in a Warmer World: Implications of Climate Change due to Enhanced Greenhouse Effect for the Ski Industry in the Australian Alps[D]. Zurich: University of Zurich, 1998.
- [13] Hennessy K, Whetton P, Smith I, et al. The Impact of Climate Change on Snow Conditions in Mainland Australia[R]. Aspendale: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 2003.
- [14] Steiger R. The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria[J]. Climate Research, 2010, 43(3): 251-262.
- [15] Scott D, McBoyle G, Mills B. Climate change and the skiing industry in southern Ontario (Canada): Exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation[J]. Climate Research, 2003, 23(2): 171-181.
- [16] Steiger R. Scenarios for skiing tourism in Austria: Integrating demographics with an analysis of climate change[J]. Journal of Sustainable Tourism, 2012, 20(6): 867-882.
- [17] Steiger R, Abegg B. The sensitivity of Austrian ski areas to climate change[J]. Tourism Planning & Development, 2013, 10(4): 480-493.
- [18] Scott D, Steiger R, Dannevig H, et al. Climate change and the future of the Norwegian alpine ski industry[J]. Current Issues in Tourism, 2019, DOI: 10. 1080/13683500. 2019. 1608919.
- [19] Scott D, Steiger R, Ruttly M, et al. The differential futures of ski tourism in Ontario (Canada) under climate change: The limits of snowmaking adaptation[J]. Current Issues in Tourism, 2019, 22(11): 1327-1342.
- [20] 崔玉环, 叶柏生, 王杰, 等. 乌鲁木齐河源1号冰川度日因子时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 265-274. [Cui Y H, Ye B S, Wang J, et al. Analysis of the spatial-temporal variations of the positive degree-day factors on the glacier No. 1 at the headwaters of the Rùmqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 265-274.]
- [21] Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas[J]. Journal of Hydrology, 2003, 282(1-4): 104-115.
- [22] 张勇, 刘时银, 丁永建. 中国西部冰川度日因子的空间变化特征[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 89-98. [Zhang Y, Liu S Y, Ding Y J. Spatial variation of degree-day factors on the observed glaciers in western China[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 89-98.]
- [23] 尹雄锐, 章光新, 杨帆, 等. 东北半干旱地区流域分布式水文模

2020年6月

- 拟:以洮儿河流域为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 137-144. [Yin X R, Zhang G X, Yang F, et al. Distributed hydrological modeling in semi-arid region in northeast China: A case study in the Taoer river basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 137-144.]
- [24] 刘时银, 丁勇建, 叶佰生, 等. 度日因子用于乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡计算的研究[R]. 兰州: 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上册), 1996. [Liu S Y, Ding Y J, Ye B S, et al. Study on the Mass Balance of the Glacier No. 1 at the Headwaters of the Urumqi River Using Degree-Day Method[C]. Lanzhou: Proceedings of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology, 1996.]
- [25] 谯程骏, 何晓波, 叶柏生. 唐古拉山冬克玛底冰川雪冰度日因子研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 257-264. [Qiao C J, He X B, Ye B S. Study of the degree-day factors for snow and ice on the Dongkemadi Glacier, Tanggula Range[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 257-264.]
- [26] 吴倩如, 康世昌, 高坛光, 等. 青藏高原纳木错流域扎当冰川度日因子特征及其应用[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 891-897. [Wu Q R, Kang S C, Gao T G, et al. The characteristics of the positive degree-day factors of the Zhadang glacier on the Nyainqêntanglha range of Tibetan plateau, and its application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 891-897.]
- [27] 高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 344-350. [Gao X, Zhang S Q, Ye B S, et al. Recent changes of glacier runoff in the Hexi inland river basin[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 344-350.]
- [28] 韩春坛, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 固液态降水分离方法探讨[J]. 冰川冻土, 2010, 20(1): 249-256. [Han C T, Chen R S, Liu J F, et al. A discuss of the separating solid and liquid precipitations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 20(1): 249-256.]
- [29] Chen R S, Liu J F, Song Y X. Precipitation type estimation and validation in China[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 917-925.
- [30] 刘俊峰, 杨建平, 陈仁升, 等. SRM 融雪径流模型在长江源区冬克玛底河流域的应用[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1149-1159. [Liu J F, Yang J P, Chen R S, et al. The simulation of snowmelt runoff model in the Dongkemadi river basin, headwater of the Yangtze river[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(11): 1149-1159.]
- [31] 冯曦, 王船海, 李书建, 等. 基于能量平衡法的融雪模型多时间尺度模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 26-31. [Feng X, Wang C H, Li S J, et al. Multi-time scale simulations with snow melting models based on energy balance theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(1): 26-31.]
- [32] 张琳娜, 郭锐, 曾剑, 等. 北京地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1780-1786. [Zhang L N, Guo R, Zeng J, et al. Research on discrimination criterion of precipitation types in Beijing in winter[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(6): 1780-1786.]
- [33] 张雪婷, 李雪梅, 高培, 等. 基于不同方法的中国天山山区降水形态分离研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 235-244. [Zhang X T, Li X M, Gao P, et al. Separation of precipitation forms based on different methods in Tianshan mountainous area, Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 235-244.]
- [34] Abegg B, Elsasser H. Climate, weather, and tourism in the Swiss alps[J]. Geographische Rundschau, 1996, 48(12): 737-742.
- [35] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49(1): 145-154.
- [36] Dai L Y, Che T, Ding Y J. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SS-MI/S data to improve the consistency of snow-depth products in China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(6): 7212-7230.
- [37] Dai L Y, Che T, Wang J, et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 14-29.
- [38] Racsko P, Szeidl L, Semenov M. A serial approach to local stochastic weather models[J]. Ecological Modelling, 1991, 57(1-2): 27-41.
- [39] Semenov M A, Barrow E M. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios[J]. Climatic Change, 1997, 35(4): 397-414.
- [40] 汪海欧, 於琍, 吕明辉, 等. 胶州湾地区居民对气候变化的感知与适应研究[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 157-167. [Wang H O, Yu L, Lv M H, et al. The perception and responses of climate change in Jiaozhou Bay area[J]. Resources Science, 2017, 39(1): 157-167.]
- [41] Rutty M, Scott D, Johnson P, et al. Using ski industry response to climatic variability to assess climate change risk: An analogue study in Eastern Canada[J]. Tourism Management, 2017, 58: 196-204.

Impact of snow-making technology improvement on ski season length in China under climate change

FANG Yan¹, Daniel SCOTT², Robert STEIGER³, WU Bihu⁴, JIANG Yiyi¹

(1. School of Recreational Sports and Tourism, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. Geography and Environmental Management, University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L3G1, Canada; 3. Department of Public Finance, University of Innsbruck, Innrain 526020 Innsbruck, Austria; 4. International Center for Recreation and Tourism Research, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Under global warming conditions, artificial snowmaking has proved to be an effective adaptation measure to climate change for ski resorts. Based on the surface climate dataset (1981-2010) and new Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) RCPs scenarios, this study assessed the impact of snow-making technology improvement (snow could be produced at -2°C rather than -5°C) on ski season length in China under climate change using the SkiSim 2.0 model. The results show that average ski season length in China would increase by 3%~12% with improved snowmaking machine, and 78% of ski areas in China could maintain a ski season of over 100 days even under the RCP 8.5 scenario in the 2080s. Ski resorts that are highly affected by climate change (for example, north, east and central regions) would receive more benefits from new technology than slightly affected areas (for example, northeast and northwest). Furthermore, geographical environmental conditions are the fundamental factors that affect the length of ski season. No matter whether snow-making technology is improved or not, the dividing line for 100-day ski season in China under climate change is Changbai Mountain-Yinshan Mountain-Qilian Mountain-Tianshan Mountain. For mitigating and adapting to climate change, more attention should be paid to technological innovation in artificial snowmaking to ensure sustainable development of China's ski industry from the supply side.

Key words: climate change; ski resort; technology improvement; mitigation measures; SkiSim 2.0; China