

研究进展

北极冰雪表面能量平衡研究进展

邹小伟^{1,2,3} 杨堤益^{2,4} 田彪² 张雷² 孙维君³ 李昭¹ 丁明虎²

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079;

² 中国气象科学研究院极地在全球变化研究所, 北京 100081;

³ 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014;

⁴ 浙江省海宁市气象局, 浙江 海宁 314400)

摘要 北极地区冰/雪-大气相互作用的过程, 尤其是冰雪表面反照率的变化, 是制约我们认识北极地区气候系统快速变化的关键科学问题。目前已有的研究表明, 随着观测技术和方法的进步, 北极冰雪表面能量平衡研究取得了较大的进展, 但由于缺乏高质量、时空连续的观测试验数据, 大部分参数化方案、遥感及模式产品等在北极不同区域的适用性仍待评估。因此, 北极地区观测站点的加密、综合观测试验的开展和多源卫星遥感体系的进一步完善, 能为遥感卫星产品及复杂参数化方案在北极的评估验证提供数据支撑, 也可以揭示更多潜在的冰雪表面能量平衡相关的过程和机理, 加深对极地海-冰/雪-气相互作用的理解, 更好地服务于极地冰冻圈与气候变化研究。

关键词 表面能量平衡 冰-气相互作用 北极 太阳辐射 湍流通量

doi: 10.13679/j.jdyj.20220001

0 引言

表面能量收支是指地表向近地表大气或地下空间支出/获取能量的情况, 它主要由地表的净短波辐射、净长波辐射、感热通量、潜热通量和地下热通量五部分构成, 当能量收支达到平衡时, 将其称之为表面能量平衡(Surface Energy Balance, SEB)^[1](能量收支过程见图 1)。其中, 作为地表最主要的能量来源, 净短波辐射由入射短波和反射短波辐射组成; 而净长波辐射则是地表最稳定、持续的能量支出, 两者组成的地表辐射收支是地-气相互作用的重要驱动力之一; 辐射分布的不均匀性导致地表温度存在差异, 影响大气边界层的水热梯度变化, 使得地-气之间以感热和潜热的形式产生能量交换; 地表下层的温度变化会滞后

于地表, 产生指向较低温度层的热通量, 调节地表的能量收支状况。总之, 表面能量平衡是地球气候系统多圈层相互作用的重要机制之一, 其各个分量对局地天气和气候的形成有着近乎决定性的作用, 同时也有助于我们更好地理解冰冻圈各要素对气候变化的响应, 加深对冰-气相互作用的理解。

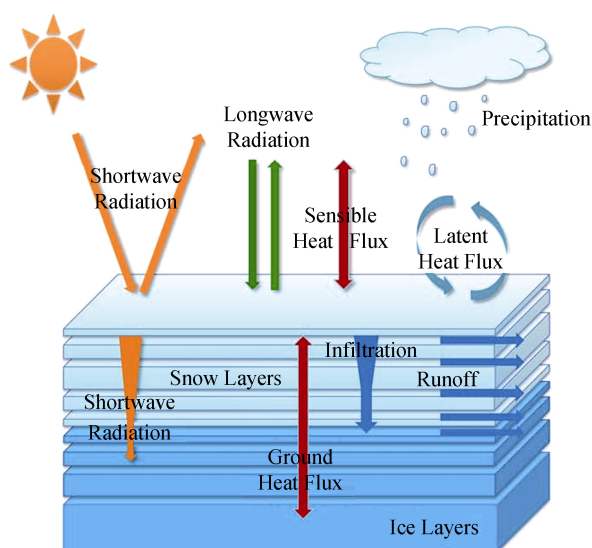
北极是全球气候变化最敏感的区域之一。与南极相比, 北极地区气候环境变化快速, 周边环境国家众多, 其变化影响范围大、程度强, 尤其受到各国科学家的关注^[2]。而 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)报告特别指出, 过去几十年来, 北极是全球增暖最剧烈的地区, 是全球平均增温幅度的 2 倍以上, 增温幅度高达 $1.2^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ^[3], 这被称为“北极放大”效应^[4]。北极气候的快速变化与地气系统的能量收支异常

[收稿日期] 2022 年 1 月收到来稿, 2022 年 6 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金项目(42122047, 42174030, 42171121)、中国气象科学研究院基本科研业务项目(2019Y010)资助

[作者简介] 邹小伟, 男, 1995 年生。博士研究生, 主要从事极地冰气相互作用研究。 E-mail: xiaoweizou14@163.com.

[通信作者] 丁明虎, E-mail: dingminghu@foxmail.com

图 1 表面能量收支过程^[5]Fig.1. The process of surface energy budget^[5]

直接相关, 众多专家学者基于卫星观测、模式模拟等多种手段开展了大量研究工作^[6-7], 并提出了一系列的理论和证据, 从能量收支的角度对“北极放大”效应的驱动机制进行解释^[8]。北极下垫面大部分地区被海冰和积雪等冰冻圈要素覆盖, 而冰冻圈下垫面的高反照率会显著地改变表面辐射收支, 并最终影响地-气相互作用, 如反照率反馈机制被认为是“北极放大”效应的重要驱动机制之一^[9]: 高反照率的海冰减少变成开阔水面, 导致海洋在夏季吸收更多短波辐射, 并在秋冬季将热量释放到大气中, 造成近地表气温升高。另外北极地区云量、水汽的变化以及北极以外的热量和水汽的极向输送等内在机制也受到越来越多关注^[8]。基于北极的重要地位和能量平衡在北极气候变化研究中的重要性, 世界气候研究计划 (World Climate Research Program, WCRP) 等多个国际计划将北极列为全球变化研究的关键地区。

为了探究北冰洋区域海冰表面能量平衡、湍流及反照率的变化特征, 1997—1998 年美国开展气-冰-海相互作用多学科的综合观测-北冰洋表面热量收支观测计划 (Surface Heat Budget of the Arctic Ocean, SHEBA)^[10], 进行气-海-冰界面能量交换的定量刻画, 并在湍流参数化、热量收支状况等研究方面有了重要进展。我国从 1999 年开始实施北极科学考察, 并多次开展大气成分、海冰

区近冰层气象及能量平衡等观测研究工作^[11]; 2007 年在北极建模和长期环境监测能力计划 (Development Arctic Modeling and Observation Capabilities for Long-Term Environmental Studies) 的支持下, 欧盟利用穿极漂流站在多年冰上进行了连续高时间分辨率的光谱反照率及常规气象观测, 并将获得的资料与 SHEBA 资料进行了对比^[12]; 为研究适用于北极地表观测的方法并提升极地数值模式的预报水平, 2013 年, 世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 启动了“极地预报计划” (Polar Prediction Project, PPP)^[13]; 2016 年, 美国科罗拉多大学通过集成来自多个卫星、再分析和地面数据源的产品, 开发了北极观测和再分析集成产品 (Arctic Observation and Reanalysis Integrated System, ArORIS), 主要用于产品验证、北极地区辐射及水汽收支状况的评估^[14]。2017 年 WMO 启动“极地预报年” (Year of Polar Prediction, YOPP) 以加强国际极地观测预报体系建设为宗旨^[15], 通过组织协调开展极地加密观测和模拟活动, 进一步加深对极地气-海-冰及海洋相关物理过程的理解; 同时, YOPP 还特别设立 2018 年 2—3 月为北极特别观测期, 以开展北极探空、浮标等国际协同观测活动^[13]。2019 年, 由德国牵头, 多国家参与实施了国际多学科北极漂流冰站计划 (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate, MOSAiC), 获得了丰富的极地大气、海冰等观测数据。目前北极观测站点分布如图 2 所示。

近几十年来, 多项研究通过多种观测工具证实^[7,16], 整个北极地区的海冰和积雪覆盖范围都呈下降趋势。表面能量平衡作为气候系统研究中较为直接有效的研究手段, 不仅可以为卫星、模式及参数化方案等提供较为可靠的地面真值验证和误差估算, 也能改进并应用于北极气候模式参数化方案, 有助于进一步探究极地冰-气相互作用, 更准确地预测北极乃至全球气候^[17-19]。然而, 由于基础数据源质量存在差异、研究方法迥异等限制, “北极放大”效应的关键驱动机制仍无定论, 不同理论之间存在分歧^[8]。目前关于北极冰-气相互作用的研究大部分集中在格陵兰冰盖、斯瓦尔巴德群岛及亚欧高北极区域, 对于海冰表面能量平衡研究相对较少。

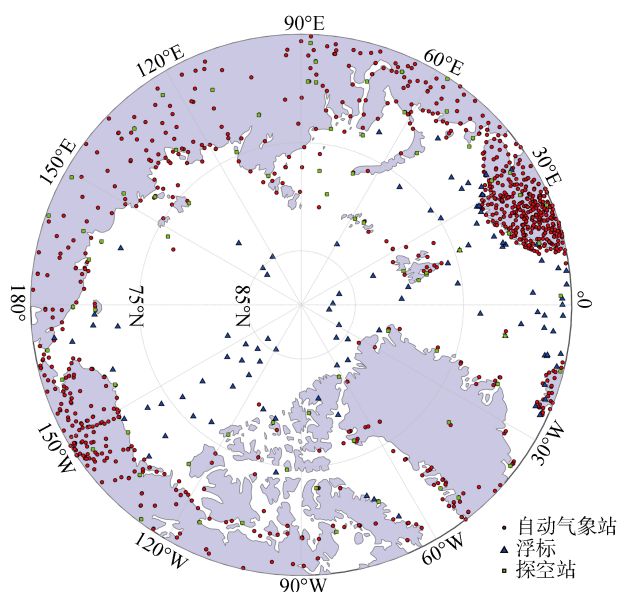


图 2 北极观测站点分布

Fig.2. Distribution of observation stations in Arctic

因此, 本文对北极地区冰雪表面能量平衡的研究进展和现状进行梳理, 并在此基础上提出与表面能量平衡相关的研究发展方向和建议。

2 冰雪表面能量平衡研究方法的发展

2.1 数值模型

20 世纪 20 年代, Ahlmann^[20]第一次提出了包括入射辐射、气温和风速的经验模型; Sverdrup^[21]提出了能量传输模型, 估算了能量平衡各分量, 第一个把梯度理论应用到冰雪面上; 1960 年, 第一个计算机模拟的积累和消融模型被开发出来^[22]。能量平衡模型的早期阶段涉及到积雪, 一般旨在为流域模型提供融水输入, 之后随着计算机性能和理论水平的提高, 雪模型从传统的基于冰川消融与气温之间线性关系统计的简单参数模型——度日模型逐步发展到描述冰川表面物理过程的单点能量平衡模型, 再进一步完善为分布式能量平衡模型^[22]。

度日模型由 Finsterwalder^[23]在阿尔卑斯冰川研究中首次提出, 随后被广泛用于北极地区冰川对气候变化的响应、冰雪消融模拟研究中^[24]。度日模型作为半经验模型, 通过度日因子将冰川消融和正积温联系起来, 极大地简化了冰川下垫面的复杂的物理过程, 但该模型无法描述冰雪消融

的物理过程, 且模拟的精度随时间分辨率的提高而降低, 为提高其模型精度, 越来越多的变量因子经耦合后进入模型进行度日因子的订正^[25]。单点能量平衡模型可以较为全面地考虑冰川下垫面与气候系统之间复杂的相互作用, 多被用于开发、测试和改进能量平衡理论在冰川物质平衡中的应用^[26], 在北极地区表面能量平衡的研究^[19,27-31]中得到了广泛的应用。另外, 德国柏林洪堡大学研发的 COSIMA(Coupled Snowpack and Ice surface energy and Mass balance model)模型不仅考虑大气和冰川表面之间的相互作用, 还充分考虑了冰面下 10 m 雪层中的物质和能量交换过程^[32], 进一步提高了模型的模拟精度。但受单点能量平衡模型空间分辨率的限制, 相关研究往往要求气象数据具有一定的区域代表性。为了弥补单点能量平衡模型在空间分辨率上的不足, 大量的能量平衡模型研究集中于从点尺度到分布式建模^[33]以及时间分辨率的提高, 来不断提高消融模型的模拟性能。Oerlemans^[34]研究了海拔梯度对能量和物质平衡的影响, 发现能量平衡方程中的各组分及地表反照率均随着海拔的变化而变化, 并在此基础上提出随海拔变化的简化能量平衡方程。Arnold 等^[35-36]分析了地形对净短波辐射和反照率的影响, 并将分布式能量平衡模型应用到瑞士和 Svalbard 的山地冰川。Hock^[22]通过改进辐射、反照率参数化方案建立的分布式能量-物质平衡模型在瑞典 Storglaciären 冰川消融进行了小时尺度的准确模拟。Aas 等^[37]利用 WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model)模拟了新奥尔松附近苔原区的能量平衡, 发现该模式可以较好地模拟地表温度, 但会高估日变化, 并在季节和更短时间(如月变化、日变化)尺度上对净短波辐射、长波辐射等个体能量通量表现出相当大的偏差。分布式能量平衡模型可以从物理机制上更加准确地揭示冰川的消融过程, 尤其在地形复杂、具有较强空间变异性的区域, 但其输入参数较多, 且理论基础相对复杂, 野外观测存在一定的困难。

2.2 模型驱动产品

除观测的气象数据外, 模型发展过程中也将遥感和再分析数据作为模型驱动, 为缺少观测的地区提供工具支持。目前国内外多个研究机构正基于现有的国际多源遥感观测资料, 借助于定量

遥感反演、多源数据融合、数据同化等技术,改进北极地区地表与大气辐射产品质量,拓宽高质量辐射数据的时间覆盖范围,以用于开展地气系统的能量收支与气候变化研究,如美国航空航天局地球观测系统的 CERES 云量与地球辐射能量(Clouds and the Earth's Radiant Energy System)产品、AIRS 云量与气象(Atmospheric Infrared Sounder)产品、MODIS(Moderate resolution Imaging Spectroradiometer)云量产品、GEWEX-SRB(Global Energy and Water Exchanges Project-Surface Radiation Budget)辐射产品等^[13],欧洲气象卫星组织(European Meteorological Satellite, EUMETSAT)气候监测卫星应用基础设施生产的 CM SAF(satellite application facility on climate monitoring)云、反照率和辐射系列产品,北京师范大学联合国内相关研究机构研发的“全球气候数据集”系列地表与大气辐射产品等^[8]。

气候模式在气候变化、冰盖变化研究等方面发挥着非常重要的作用^[38-39]。近年来,区域气候模式也被应用到能量平衡的模拟中。van Tricht 等^[40]利用卫星观测(CloudSat and CALIPSO, Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)、区域气候模式结果(Regional Atmospheric Climate Model, RACMO2.3)和雪模型(SNOWPACK)进行组合,发现云对格陵兰冰盖的融水再冻结存在明显的抑制作用。Noël 等^[41]利用区域站点观测值评估了 RACMO2.3 模式在格陵兰冰盖 1958—2016 年表面能量平衡结果,发现该模式结果与观测值具有较好的一致性。Huai 等^[42]利用能量平衡模型得到的结果对多种再分析资料和区域气候模式 RACMO2.3 模式结果进行评估,发现 RACMO2.3 模式可以很好地模拟格陵兰冰盖的表面能量平衡,对格陵兰冰盖能量平衡研究由点推到面的推广提供了依据。

3 冰雪表面能量平衡研究的主要进展

能量平衡模型的发展也是能量平衡中各能量项参数化方案适配性提升的过程,参数化方案能够通过数学建模的方式大致还原全球或者区域各能量平衡要素特征的大小及变化^[43],尤其在北极地区,受到极区天气环境及观测成本的影响,常规

观测(自动气象站、探空及浮标等)较为稀少(图 2),且卫星观测在北极地区同样存在不确定性^[8,13],因此数值模拟是在北极地区进行表面能量平衡研究的重要手段,对气候分析、气候机制的发掘以及气候预估有着十分关键的作用。同时,参数化方案的选择对数值模拟的精度起着至关重要的作用。

3.1 辐射研究进展

近地面辐射收支影响着天气和气候形成,近地面辐射主要包括入射、反射短波辐射和向下、向上长波辐射。

3.1.1 短波辐射通量

短波辐射是地表最主要的能量来源,影响短波辐射的因素主要有云量、反照率、地形、太阳高度角等^[44],其中最重要的因素是云量,云能与地面产生多重反射及散射从而造成地面太阳辐射增加,也能有效拦截短波辐射或发射长波辐射,导致太阳辐射的减少或者向下长波辐射的增加^[45]。云量通过调节地表的辐射收支,使得大气中气温、水汽、风速、气溶胶及地表反照率等因素呈现出明显的差异,进而影响表面能量收支^[46]。

在气候变暖的背景下,向极水汽输送不断增加,导致北极地区天空中云量呈现增加的趋势^[8],因此未来表面能量平衡的研究中云量将扮演非常重要的角色。Beesley^[47]研究了云量与海冰厚度的关系,发现在描述大气温度年循环的模式中,云量对能量平衡影响的内在效应是模糊的;Sedlar 等^[48]在 Svalbard 群岛的研究表明,在低太阳高度角期间,云的存在导致向下长波辐射增加,入射短波辐射减少,最终对表面能量收支产生影响;Yamanouchi^[49]通过云剖面雷达(Cloud Profiling Radar)在新奥尔松地区发现云量的增加会导致下垫面接收的向下长波辐射量显著增加;Hofer 等^[50]发现在格陵兰冰盖观测到的云量变化与该区域大气环流的变化密切相关,云量降低可以导致反照率降低致使冰盖表面消融加剧,从而得出格陵兰冰盖表面物质损失增强是由整个北极大气环流的天气尺度的变化所驱动的结论。地面观测的云量空间覆盖度有限且精度较低,目前常用的云产品多使用卫星遥感(如 MODIS 等)观测获得,或通过短波辐射^[51]、长波辐射^[17]、相对湿度^[52]及大气透过率^[53]等要素进行参数化得到(表 1)。其中,部分

遥感和再分析产品时序覆盖较长,但在北极地区存在质量问题,会导致输出的辐射产品存在数据偏差^[8];而参数化方案较为简单且具有相应的物理意义,但云的微物理过程十分复杂,其参数化结果还存在不确定性。

表 1 云量参数化方案
Table 1. The cloud parameterization schemes

公式	参考文献
$N = 1 - trc$	[54]
$N = 1.3 - 1.4 \times \left(\frac{SDR}{S_{TOA}} \right)$	[55]
$N = \frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_{cs}}{\varepsilon_{ov} - \varepsilon_{cs}}$	[18]
$N = 0.832 \times e^{\frac{RH-100}{41.6}}$	[52]
$N = \frac{1 - trc}{k}$	[53]

注: trc 指 cloud transmission factor, SDR 指入射短波辐射, S_{TOA} 指大气层顶辐射, RH 指相对湿度, N 指云量, ε_{eff} : 大气有效发射率, ε_{cs} 指晴天条件下辐射系数, ε_{ov} 指阴天条件下辐射系数

反照率主要通过影响反射短波辐射进而影响表面能量平衡,另外海冰-反照率反馈机制在“北极放大”效应中起着非常重要的作用^[56]。观测研究表明,受夏季海冰覆盖面积不断减少、海冰融化期的提前及海冰厚度变薄等的影响,北极海冰反照率在过去 30 年间出现大幅降低^[16],这导致辐射强迫显著增强^[8]。反照率的变化受到较多因素(表面污化程度、下垫面性质、降水相态等)的影响。Klok 等^[57-58]在阿拉斯加等地区发现,降落在冰川表面的黑碳等吸光性物质会显著降低地表反照率,增加地表吸收的短波辐射,加速冰川消融,同时,相关研究还发现吸光性物质对积雪的消融和海冰融池的生成同样存在显著的影响^[30]。Ohmura^[59]研究表明,不同性质的地表(如积雪、冻土、苔原)反照率差异很大,这导致不同下垫面接收的短波辐射存在显著差异。Dou 等^[30]在北极的观测发现,液态降水会导致海冰反照率降低,增加地表获得的净短波辐射,同时液态降水还可以通过释放潜热加速冰雪消融;韩微等^[60]利用环北极气象站点的观测资料研究发现,北极地区春季降水形态呈现由固态向液态转变的态势;Huai 等^[61]在格陵兰冰盖也发现了类似的降水形态转变趋势,这表明未来一段时间内北极地区地表反照率会持

续降低。除现场观测外,卫星反演也可得到反照率数据,但受到大气中云量、气溶胶、臭氧及水汽等含量的影响,卫星产品仍存在部分问题,气候模式中反照率的模拟同样存在不确定性^[62]。因此,反照率的参数化方案需要考虑多种因素的综合作用,需结合更多的冰雪综合观测和地表微物理过程机制进行研究。

地形(如阴影、坡度)对能量平衡的影响也不容忽视^[44],在确定地表辐射收支等方面起着重要作用。Kondrat'Yev^[63]在 1965 年提出一种适合山区净辐射的参数化方案,该方案考虑到地形的阻挡作用,将入射短波辐射分为太阳直接辐射、大气散射辐射和周围地形的反射辐射;Iqbal^[64]和 Kumar 等^[44]根据不同地理位置、时间和大气透过率分别提出不同地区晴空条件下入射短波辐射的理论估算方案,将地形坡度纳入到方案中并分别计算直接辐射和散射辐射,另外 Iqbal^[64]还考虑了大气中水汽、臭氧和气溶胶等引起的太阳辐射的透射,其被广泛应用到与辐射相关的研究中。

目前的短波辐射参数化方案较为成熟,但其对云的高低、类型等特征没有进行区分,这会导致参数化结果存在一定的不确定性。另外,由于观测环境的限制,北极地区可获取的有效大气成分或地面观测数据十分稀少,观测数据的稀缺也使得多个大气再分析项目在此区域没有足够可用的同化输入资料^[65],因此需要提高整体大气观测能力,同时加强云的物理机制的研究。

3.1.2 长波辐射通量

对表面能量平衡而言,净辐射通常是下垫面冰雪消融的主要贡献者^[22],但对具体辐射分量的研究表明,向下长波辐射是最持续、稳定的能量来源^[66]。长波辐射主要受云量、云光学厚度、温度和水汽含量等因素的影响,与短波辐射和湍流通量相比,长波辐射作为表面能量收入源的重要性可能随气候变化而变化,且由于短波辐射的季节依赖性,长波辐射仍然是一个非常大的贡献者,尤其在极地地区(存在极夜现象)。因此准确地观测和模拟长波辐射对表面能量平衡研究及评估极地冰雪融化对气候变化的响应具有重要意义。

van den Broeke 等^[67]基于西格陵兰冰盖架设的自动气象站获取的长波辐射观测资料发现,受

到不同的下垫面和有效云光学厚度影响,冰盖边缘的向下和向上长波辐射均大于内陆区域。Yamanouchi^[49]指出, Svalbard 群岛受到北大西洋暖湿空气入侵时, 该区域气温上升、云量显著增加, 导致向下长波辐射从 $170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $320\sim 330 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。大量观测与模拟证据表明, 北极地区大气水汽含量近 40 年来呈显著增加的趋势, 同时伴随着云量的显著增加, 这导致向下长波辐射增加, “北极放大”效应增强^[68-69]。向下长波辐射的模拟主要基于斯蒂芬-玻尔兹曼定律进行, 其重点是针对辐射系数的模拟, 大气中水汽、温度、气溶胶及云的特性等因子都会对辐射系数的模拟产生影响^[70]。目前已经建立了较多向下长波辐射参数化方案, 在晴空条件下, 辐射系数多为近地表温度及水汽压的函数(表 2), 在全天空条

件下需要加上云的影响(表 3)^[71]。Sedlar 和 Hock^[70]在瑞典北部 Storglaciaren 冰川利用实测数据进行多个向下长波辐射参数化方案的评估发现: Konzelmann 等^[72]的参数化方案具有最好的评估表现; 此外, 结果还表明仅依赖气温的参数化方案比包含水汽的参数化方案精度差, 说明水汽在向下长波辐射的参数化中占有更重要的地位。

总之, 现有的长波辐射参数化方案多为基于水汽或温度的区域性经验公式, 在不同区域的适用性较差^[70]。另外, 由于目前对云的部分微物理过程探究不够深入, 导致数值模式难以准确地模拟云的变化^[73-74], 从而导致全天空条件下长波辐射参数化存在不确定性。因此, 未来的研究应向着通过增强的统计或物理方法揭示大气中水汽等要素影响长波辐射的机理的方向发展。

表 2 晴空条件下辐射系数的参数化方案

Table 2. The parameterization schemes of radiation coefficient under clear sky conditions

公式	a	b	c	参考文献
$a + b \times e^c$	0.52	0.065		[75]
$a - b \times 10^{e^c}$	0.83	0.18	0.067	[76]
$a^{-6} \times T^b$	9.365	2		[77]
$1 - a \times e^{[-b^{-4} \times (273 - T)^2]}$	0.261	7.77		[78]
a	0.7855			[79]
$a \times \left(\frac{e}{T}\right)^{\frac{1}{b}}$	1.24	7		[80]
$a \times (1 - e^{-\frac{T}{2016}})$	1.08			[81]
$0.23 + a \times \left(\frac{100 \times e}{T}\right)^{\frac{1}{b}}$	0.484	8		[72]
$1 - \left(1 + a \times \left(\frac{e}{T}\right)\right) \times e^{\left(-\left(1.2 + 3 \times a \times \frac{e}{T}\right)^b\right)}$	46.5	0.5		[82]
$\left(a + b \times \left(\frac{T}{273.16}\right)^6 + c \times \left(\frac{465 \times e}{25 \times T}\right)^{0.5}\right) / (\sigma_{\text{SB}} \times T^4)$	58.38	113.7	96.96	[83]
$1 - a \times e^{\left(-b \times \frac{e}{T}\right)}$	0.43	11.5		[45]

注: e 指水汽压, T 指气温, σ_{SB} 指黑体系数

表 3 全天空条件下辐射系数的参数化方案

Table 3. The parameterization schemes of radiation coefficient under all-sky conditions

公式	a	b	c	参考文献
$\varepsilon_{\text{cs}} \times (1 + a \times N^2)$	0.22			[84]
$\varepsilon_{\text{cs}} + a \times N^b$	1.22	3		[85]
$\varepsilon_{\text{cs}} \times (1 - N^a) + \varepsilon_{\text{ov}} \times N^b$	4	4	0.952	[72]

3.2 湍流通量研究进展

湍流通量中的感热和潜热通常表示下垫面温度变化的过程中, 水分发生相变和非相变时与大气之间的能量输送。湍流能量来源于湍流粘性应力和净浮力做功, 感热和潜热通量的大小取决于气-地温差、比湿度差、风速、大气稳定度、地表粗糙度等因素^[3]。目前计算感热和潜热通量的方法主要有涡动相关法和总体空气动力学法等, 涡动相关法是通过三维风速仪直接观测到的风、温、湿等脉动资料来计算感热和潜热通量, 这是目前精度最高的湍流通量计算方法之一^[86], 但由于受到观测条件的限制, 涡动相关系统在极地较难开展观测, 因此极地湍流通量主要通过总体空气动力学法进行计算。

湍流通量参数化主要包括空气动力学粗糙度和相似函数的参数化。粗糙度是表征陆面过程的基本参数, 是由莫宁-奥布霍夫相似理论外推特征要素到与地表相等的高度, 这与下垫面类型有着非常紧密的联系。雪冰表面动量粗糙度的计算方法一般利用两层风速关系计算得到, 但需要较为复杂的迭代计算。Smeets 和 van den Broeke^[87]基于莫宁-奥布霍夫相似理论提出了新的适用于格陵兰冰盖消融区粗糙度的计算方案, 该方案对数据的质量要求相对较高, 将总体理查逊数作为稳定度因子进行参数化, 克服了循环迭代的缺陷。相似函数表示大气近表层中温度、湿度和水平风廓线的变化关系, 是表征大气边界层稳定性参量的一种固定函数形式。目前存在较多相似函数方案, 主要包括迭代和非迭代方案; 迭代方案需要在近中性大气层结的初始条件下, 通过迭代运算使莫宁-奥布霍夫长度收敛, 虽然精度较高但会占用较大的运算资源, 如 Dyer^[88]、Holtslag 和 de Bruin^[89]等; 而非迭代方案往往计算相对较为简单, 主要将理查逊数作为大气稳定度的判定条件, 利用经验性公式进行稳定度校正, 如 Louis 等^[90], 目前被广泛应用于气候模式中。

卞林根等^[91]利用北冰洋浮冰站和“雪龙”号考察船获得的大气边界层观测资料结合涡旋相关法和廓线法对浮冰站附近开阔洋面的湍流通量进行相关研究: 发现无冰海面以感热形式向大气输送的能量明显大于冰面, 浮冰观测点冰面受到周围水域暖平流影响出现逆湿现象, 与无冰海面潜

热输送方向相反。李剑东等^[92]利用北冰洋浮冰区获得的观测资料, 对稳定大气层结下不同普适函数在雪冰下垫面上的适用性进行了研究, 并指出 Holtslag 和 de Bruin 的普适函数适用性更好。卞林根等^[93]在北冰洋浮冰区的相关研究中发现, 与 Holtslag 和 de Bruin 的普适函数相比, SHEBA 试验提出的新参数化方案中的普适函数在大气层结呈弱稳定性($0 < z/L < 0.1$)时适用性更强。

总的来说, 目前北极地区湍流通量的研究主要依靠参数化进行, 但在北冰洋浮冰区选择不同参数化方案的计算结果存在明显的差异, 各参数化方案的普适性有待进一步评估^[93], 因此在雪冰表面的湍流相关理论研究仍需要通过大量的野外观测进行验证、评估。

3.3 热通量研究进展

在能量平衡组成的各能量项中, 冰雪热通量是衡量地表与地下近表面热量交换的重要指标, 是由热传导通量和渗透辐射组成。相比于其他分量, 热通量的量级较小, 故早期的研究往往将其忽略^[94]。但近年来研究证明, 在下垫面消融期间忽视热通量可能会使得冰雪融化能量偏高/低^[31,94-95], 导致模型模拟的不确定性增加。Giesen 等^[95]认为与其他能量项相比, 渗透辐射量占比非常小, 因此在计算时可将其忽略; 而 Munneke 和 van den Broeke^[96]在格陵兰冰盖顶点进行的能量平衡研究中发现, 短波辐射渗透量虽然较小, 但对正确模拟积雪温度起着至关重要的作用。短波辐射的渗透能力与介质的密度密切相关, 短波辐射渗透量可以通过 Brandt 和 Warren 方案基于 Beer 定律计算得到^[97]。van den Broeke 等^[99]研究认为, 对于干细粒雪(fine-grained dry snow)来说忽略辐射渗透是合理的, 但对于裸露的冰来说是不合理的。

目前热通量一般通过简化的一维热传导方程 $G = K_T \times \frac{\partial T}{\partial z}$ 计算得到^[28], 其中热传导系数 K_T 是衡量物体导热效率的指标, 无法进行观测, T 为温度, z 表示高度。为了简化计算, 多项研究^[29-30]通过雪密度或雪温等参数化得到 K_T , 也有根据下垫面不同介质将其设为常数(陈雪: $0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 裸冰: $2.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[3,31]。在没有融水渗浸的情况下, 积雪内的温度分布主要由热传导控制, 热传

导具有扩散特性,故计算有效热扩散系数也是得到有效热传导系数的重要手段,通过不同雪层温度曲线的振幅和位相差来模拟有效热扩散系数^[98]。当存在融水渗浸的情况下,必须要考虑融水再冻结的问题,气温和地表温度上升会导致更多的雪冰消融,但融水排放的时间和速度在很大程度上取决于积雪的存在和状态。由于雪的高反照率使得热量吸收和表面融化减少,且渗浸的融水以固体(再冻结)或液体(部分未冻结的融水)形式储存在雪中,起到质量累积的作用^[99],对地下温度和密度有显著影响;地下密度、温度和含水量的垂直变化可通过 SOMARS 模式的地下模块进行模拟^[29,100]。Verjans 等^[101]在格陵兰地区基于液态水方案发展了新的物理粒雪密实化模型,使得模型的模拟性能得到显著提升。

目前在北极地区表面能量平衡研究中,热通量的研究中大都将雪冰中的热平流及非传热过程等因素的影响忽略,这可能造成计算的热通量结果存在偏差,因此,在未来需要我们开展更多的结合雪冰微物理过程开展的观测和理论研究。

4 结论

目前已有的关于北极冰雪表面能量平衡的研究表明,随着观测技术和方法的进步,北极冰雪表面能量平衡研究取得了较大的进展,尤其是各能量项的参数化和其在区域/全球数值模式中的模拟研究,使得极地气象数值预报能力得到进一步提升。然而随着对北极地区海-冰-气相互作用认识的深入、卫星遥感在极区观测能力的提升以及国际协调观测计划的进一步开展,目前北极地区冰雪表面能量平衡的研究无法满足极地预报水平提升的需求及相关研究的进一步开展,为此提出部分相关建议。

加密观测站点,搜集、整理现有的观测数据。受地理条件限制,环北极地区地表观测站点分布

不均匀且获取的有效地面观测数据十分稀少^[13,65],如北冰洋的浮标观测的区域分布差异较大^[102-103],导致利用观测资料对再分析或模式数据进行质量评估验证时会出现空间上不稳定的问题^[65]。此外,虽然目前北极地区现有的地面气象站观测数据、遥感及模式数据较多,但存在数据混乱、重复观测等问题。因此,应加密环北极地区的观测站点,同时对不同类型的数据进行整理、归纳,加强数据的共享。

开展关键气候背景区域的长期观测,保证数据及研究的持续性。受极区环境的影响,北冰洋海冰区的观测站点持续时间较短,获取资料时间尺度受到限制,缺乏高质量、长期有效的观测资料进行海冰区大气边界层气象特征分析、不同类型产品及参数化方案的适用性评估等研究^[65]。开展长期、持续的观测,能为不同产品评估验证提供数据支撑,同时还能揭示更多潜在的表面能量平衡相关的过程和机理。

开展特定的综合观测试验,加强微观过程和机理研究。目前北极地区大部分观测中,观测要素不够全面,尤其缺乏云量、反照率等要素的观测。这不仅导致云量、反照率等要素的产品的评估及相关研究受限,还导致不同研究之间存在分歧^[8]。因此,在极地需要开展更为综合的、全面的观测试验,加强云、雪冰的微观物理过程研究,为云量、反照率及冰下过程的研究提供理论支撑,并据此建立更加合理、完善的理论模型,更好地服务于极地气象研究。

进一步完善大尺度、立体、动态、连续的多源卫星遥感监测体系,同时与冰冻圈要素的地面观测及动态变化模拟研究相结合。目前北极地区的观测手段较为单一(自动气象站/浮标/遥感/探空观测等),这导致获取的观测资料无法对某些现象或机理进行充分、合理的解释。因此,应综合各种观测手段,进行多尺度、多手段的综合监测,为进行更加深入的科学研究提供更全面的手段支撑。

参考文献

- 1 杨堤益,丁明虎,邹小伟. 南极冰盖地表能量平衡的研究进展[J]. 极地研究, 2021, 33(1): 99-114.
- 2 邹小伟. 北极 Austre Lovénbreen 冰川表面能量平衡研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.
- 3 武丰民,李文铠,李伟. 北极放大效应原因的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 232-242.
- 4 SCREEN J A, SIMMONDS I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. Nature, 2010,

- 464(7293): 1334-1337.
- 5 DING B H, YANG K, YANG W, et al. Development of a Water and Enthalpy Budget-based Glacier mass balance Model (WEB-GM) and its preliminary validation[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3146-3178.
- 6 Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[R/OL]. (2016-06) [2022-05-15]. https://www.klimamanifest-von-heiligenroth.de/wp/wp-content/uploads/2016/06/IPCC_2013_WG1AR5_S916_S917_Extremwetter_Zitate_mitTitelCover.pdf.
- 7 MEREDITH M P, SOMMERKORN M, CASSOTTA S, et al. Chapter 3: Polar Regions[M]// Intergovernmental Panel on Climate Change: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2019: 203-320.
- 8 曹云锋, 梁顺林. 北极地区快速升温的驱动机制研究进展[J]. *科学通报*, 2018, 63(26): 2757-2771.
- 9 SERREZE M C, BARRY R G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 77(1-2): 85-96.
- 10 沈辉, 杨清华, 孙启振, 等. 2016 年夏季北冰洋浮冰站近地层辐射和湍流通量观测[J]. *海洋学报*, 2019, 41(03): 12-22.
- 11 DING M H, TIAN B, ZHANG T, et al. Shipborne observations of atmospheric black carbon aerosol from Shanghai to the Arctic Ocean during the 7th Chinese Arctic Research Expedition[J]. *Atmospheric Research*, 2018, 210: 34-40.
- 12 VIHMA T, JAAGUS J, JAKOBSON E, et al. Meteorological conditions in the Arctic Ocean in spring and summer 2007 as recorded on the drifting ice station Tara[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(18): L18706.
- 13 姜珊, 杨清华, 孙启振, 等. 极地预报年及相关科学问题[J]. *海洋学报*, 2018, 40(11): 157-165.
- 14 CHRISTENSEN M W, BEHRANGI A, L'ECUYER T S, et al. Arctic observation and reanalysis integrated system: A new data product for validation and climate study[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(6): 907-916.
- 15 WERNER K, JUNG T, GOESSLING H, et al. The Year of Polar Prediction—from research to improved environmental safety[C]//Arctic Frontiers, 2018, Tromsø, Norway: WMO.
- 16 ZHANG R D, WANG H L, FU Q, et al. Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(48): 23947-23953.
- 17 van den BROEKE M, REIJMER C, van de WAL R. Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D9): D09103.
- 18 van den BROEKE M, van AS D, REIJMER C, et al. Assessing and improving the quality of unattended radiation observations in Antarctica[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(9): 1417-1431.
- 19 van den BROEKE M R, SMEETS C, van de WAL R. The seasonal cycle and interannual variability of surface energy balance and melt in the ablation zone of the west Greenland ice sheet[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(2): 377-390.
- 20 AHLMANN H W. Scientific results of the Norwegian-Swedish Spitzbergen Expedition 1934: The fourteenth of July glacier. Part V[M]. Centraltryckeriet, 1935.
- 21 SVERDRUP H U. Part IV. The ablation on Isachsen's plateau and on the fourteenth of July glacier in relation to radiation and meteorological conditions[J]. *Geografiska Annaler*, 1935, 17(3-4): 145-166.
- 22 HOCK R. Glacier melt: A review of processes and their modelling[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(3): 362-391.
- 23 FINSTERWALDER S. Der Suldenferner[J]. *Zeitschrift des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, 1887, 18: 72-89.
- 24 DE WOUL M, HOCK R. Static mass-balance sensitivity of Arctic glaciers and ice caps using a degree-day approach[J]. *Annals of Glaciology*, 2005, 42: 217-224.
- 25 HOCK R. A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation[J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(149): 101-111.
- 26 HAY J E, FITZHARRIS B B. A comparison of the energy-balance and bulk-aerodynamic approaches for estimating glacier melt[J]. *Journal of Glaciology*, 1988, 34(117): 145-153.
- 27 WESTERMANN S, LÜERS J, LANGER M, et al. The annual surface energy budget of a high-Arctic permafrost site on Svalbard, Norway[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(2): 245-263.
- 28 GIESEN R H, ANDREASSEN L M, OERLEMANS J, et al. Surface energy balance in the ablation zone of Langfjordjøkelen, an Arctic,

- maritime glacier in northern Norway[J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(219): 57-70.
- 29 KARNER F, OBLEITNER F, KRISMER T, et al. A decade of energy and mass balance investigations on the glacier Kongsvegen, Svalbard[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(10): 3986-4000.
- 30 DOU T F, XIAO C D, LIU J P, et al. A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: Earlier and increasing liquid precipitation[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(4): 1233-1246.
- 31 ZOU X W, DING M H, SUN W J, et al. The surface energy balance of Austre Lovénbreen, Svalbard, during the ablation period in 2014[J]. *Polar Research*, 2021, 40.
- 32 李宏亮, 王璞玉, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东支能量-物质平衡模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 24-35.
- 33 ØSTBY T. Distributed energy and surface mass balance modeling of Austfonna, Svalbard[D]. Oslo: Oslo University, 2010.
- 34 OERLEMANS J. A model for the surface balance of ice masses: Part I: Alpine glaciers[J]. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 1991, 27: 63-68.
- 35 ARNOLD N S, WILLIS I C, SHARP M J, et al. A distributed surface energy-balance model for a small valley glacier. I. Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Valais, Switzerland[J]. *Journal of Glaciology*, 1996, 42(140): 77-89.
- 36 ARNOLD N S, REES W G, HODSON A J, et al. Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2006, 111(F2): F02011.
- 37 AAS K S, BERNTSEN T K, BOIKE J, et al. A comparison between simulated and observed surface energy balance at the Svalbard Archipelago[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54(5): 1102-1119.
- 38 张通, 赵励耘, 唐学远, 等. 近期国际冰盖模式比较计划回顾及启示[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(4): 509-515.
- 39 DECONTO R M, POLLARD D, ALLEY R B, et al. The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica[J]. *Nature*, 2021, 593(7857): 83-89.
- 40 VAN TRICHT K, LHERMITTE S, LENAERTS J T M, et al. Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10266.
- 41 NOËL B, van de BERG W J, van WESSEM J M, et al. Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using RACMO2-Part 1: Greenland (1958–2016)[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(3): 811-831.
- 42 HUAI B J, van den BROEKE M R, REIJMER C H. Long-term surface energy balance of the western Greenland Ice Sheet and the role of large-scale circulation variability[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(11): 4181-4199.
- 43 HINES K M, BROMWICH D H, BAI L S, et al. Development and testing of polar WRF. Part III: Arctic land[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(1): 26-48.
- 44 KUMAR L, SKIDMORE A K, KNOWLES E. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, 11(5): 475-497.
- 45 IZOMON M G, MAYER H, MATZARAKIS A. Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, 65(10): 1107-1116.
- 46 CHEN J Z, QIN X, KANG S C, et al. Effects of clouds on surface melting of Laohugou glacier No. 12, western Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology*, 2018, 64(243): 89-99.
- 47 BEESLEY J A. Estimating the effect of clouds on the Arctic surface energy budget[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D8): 10103-10117.
- 48 SEDLAR J, TJERNSTRÖM M, MAURITSEN T, et al. A transitioning Arctic surface energy budget: The impacts of solar zenith angle, surface albedo and cloud radiative forcing[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(7-8): 1643-1660.
- 49 YAMANOCHI T. Arctic warming by cloud radiation enhanced by moist air intrusion observed at Ny-Ålesund, Svalbard[J]. *Polar Science*, 2019, 21: 110-116.
- 50 HOFER S, TEDSTONE A J, FETTWEIS X, et al. Decreasing cloud cover drives the recent mass loss on the Greenland ice sheet[J]. *Science Advances*, 2017, 3(6): e1700584.
- 51 FAVIER V, WAGNON P, CHAZARIN J P, et al. One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana glacier 15, Ecuadorian Andes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D18): D18105.
- 52 LISTON G E, ELDER K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet)[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(2): 217-234.
- 53 MÖLG T, CULLEN N J, KASER G. Solar radiation, cloudiness and longwave radiation over low-latitude glaciers: Implications for

- mass-balance modelling[J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(190): 292-302.
- 54 CRAWFORD T M, DUCHON C E. An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(4): 474-480.
- 55 SICART J E. Contribution à l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical: Le Zongo, Bolivie[D]. Paris 6, 2002.
- 56 杨清华, 张占海, 刘骥平, 等. 海冰反照率参数化方案的研究回顾[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(1): 14-21.
- 57 KLOK E J, NOLAN M, van den BROEKE M R. Analysis of meteorological data and the surface energy balance of McCall glacier, Alaska, USA[J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(174): 451-461.
- 58 KLOK E J, OERLEMANS J. Model study of the spatial distribution of the energy and mass balance of Morteratschgletscher, Switzerland[J]. *Journal of Glaciology*, 2002, 48(163): 505-518.
- 59 OHMURA A. Present status and variations in the Arctic energy balance[J]. *Polar Science*, 2012, 6(1): 5-13.
- 60 韩微, 效存德, 窦挺峰, 等. 北极地区春季降水呈现固态向液态转变的态势[J]. *科学通报*, 2018, 63(12): 1154-1162.
- 61 HUAI B J, van den BROEKE M R, REIJMER C H, et al. Quantifying rainfall in Greenland: A combined observational and modeling approach[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2021, 60(8): 1171-1188.
- 62 KOENIGK T, DEVASTHALE A, KARLSSON K G. Summer Arctic sea ice albedo in CMIP5 models[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(4): 1987-1998.
- 63 KONDRAT'YEV K Y. Radiative heat exchange in the atmosphere[M]. Franklin Book Company, 1965.
- 64 IQBAL M. An introduction to solar radiation[M]. Toronto: Academic Press, 1983: 390.
- 65 LINDSAY R, WENSNAHAN M, SCHWEIGER A, et al. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(7): 2588-2606.
- 66 OHMURA A. Physical basis for the temperature-based melt-index model[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(4): 753-761.
- 67 van den BROEKE M, SMEETS P, ETTEMA J, et al. Surface radiation balance in the ablation zone of the west Greenland ice sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): D13105.
- 68 KOMATSU K K, ALEXEEV V A, REPINA I A, et al. Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 2872.
- 69 MATTINGLY K S, MOTE T L, FETTWEIS X, et al. Strong summer atmospheric rivers trigger Greenland ice sheet melt through spatially varying surface energy balance and cloud regimes[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(16): 6809-6832.
- 70 SEDLAR J, HOCK R. Testing longwave radiation parameterizations under clear and overcast skies at Storglaciären, Sweden[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(1): 75-84.
- 71 杨堤益. 东南极冰盖典型下降风区表面能量平衡的参数化研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- 72 KONZELMANN T, van de WAL R S W, GREUELL W, et al. Parameterization of global and longwave incoming radiation for the Greenland ice sheet[J]. *Global and Planetary Change*, 1994, 9(1/2): 143-164.
- 73 SANDU I, BELJAARS A, BECHTOLD P, et al. Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction (NWP) models?[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 117-133.
- 74 BROMWICH D H, OTIENO F O, HINES K M, et al. Comprehensive evaluation of polar weather research and forecasting model performance in the Antarctic[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(2): 274-292.
- 75 BRUNT D. Notes on radiation in the atmosphere. I[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1932, 58(247): 389-420.
- 76 ÅNGSTRÖM A. A study of the radiation of the atmosphere: Based upon observations of the nocturnal radiation during expeditions to Algeria and to California[M]. Urbana-Champaign Smithsonian Institution, 1915.
- 77 SWINBANK W C. Long-wave radiation from clear skies[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1964, 90(386): 488-493.
- 78 IDSO S B, JACKSON R D. Thermal radiation from the atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(23): 5397-5403.
- 79 MAYKUT G A, CHURCH P E. Radiation climate of barrow Alaska, 1962-66[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1973, 12(4): 620-628.
- 80 BRUTSAERT W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies[J]. *Water Resources Research*, 1975, 11(5): 742-744.
- 81 SATTERLUND D R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere[J]. *Water Resources Research*, 1979, 15(6): 1649-1650.
- 82 PRATA A J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, 122(533): 1127-1151.

- 83 DILLEY A C, O'BRIEN D M. Estimating downward clear sky long-wave irradiance at the surface from screen temperature and precipitable water[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1998, 124(549): 1391-1401.
- 84 BOLZ H M. Die Abhängigkeit der infraroten Gegenstrahlung von der Bewölkung[J]. Z. Meteorol, 1949, 3: 201-203.
- 85 KÖNIG-LANGLO G, AUGSTEIN E. Parameterization of the downward long-wave radiation at the earth's surface in polar regions[J]. Meteorologische Zeitschrift, 1994, 3: 343-347.
- 86 孙维君. 祁连山老虎沟 12 号冰川能量-物质平衡模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- 87 SMEETS C J P P, van den BROEKE M R. Temporal and spatial variations of the aerodynamic roughness length in the ablation zone of the Greenland ice sheet[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2008, 128(3): 315-338.
- 88 DYER A J. A review of flux-profile relationships[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1974, 7(3): 363-372.
- 89 HOLTSLAG A A M, DE BRUIN H A R. Applied modeling of the nighttime surface energy balance over land[J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27(6): 689-704.
- 90 LOUIS J F, TIEDTKE M, GELEYN J F. A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF[R]. In ECMWF Workshop Planetary Boundary Layer Parameterization, Reading, United Kingdom, 1982.
- 91 卞林根, 高志球, 陆龙骅, 等. 北冰洋夏季开阔洋面和浮冰近地层热量平衡参数的观测估算[J]. 中国科学: 地球科学, 2003, 33(2): 139-147.
- 92 李剑东, 卞林根, 高志球, 等. 北冰洋浮冰区近冰层湍流通量计算方法比较[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 368-375.
- 93 卞林根, 马永锋, 逯昌贵. 北冰洋浮冰区湍流通量观测试验及参数化研究[J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 27-35.
- 94 BOIKE J, ROTH K, IPPISCH O. Seasonal snow cover on frozen ground: Energy balance calculations of a permafrost site near Ny-Ålesund, Spitsbergen[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D2): ALT4-1.
- 95 GIESEN R H, ANDREASSEN L M, van den BROEKE M R, et al. Comparison of the meteorology and surface energy balance at Stor-breen and Midtdalsbreen, two glaciers in southern Norway[J]. The Cryosphere, 2009, 3(1): 57-74.
- 96 KUIPERS MUNNEKE P, van den BROEKE M R, REIJME C H, et al. The role of radiation penetration in the energy budget of the snowpack at summit, Greenland[J]. The Cryosphere, 2009, 3(2): 155-165.
- 97 BRANDT R E, WARREN S G. Solar-heating rates and temperature profiles in Antarctic snow and ice[J]. Journal of Glaciology, 1993, 39(131): 99-110.
- 98 SERGIENKO O V, MACAYEAL D R, THOM J E. Reconstruction of snow/firn thermal diffusivities from observed temperature variation: Application to iceberg C16, Ross Sea, Antarctica, 2004-07[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 91-95.
- 99 VAN PELT W J J, POHJOLA V A, REIJMER C H. The changing impact of snow conditions and refreezing on the mass balance of an idealized Svalbard glacier[J]. Frontiers in Earth Science, 2016, 4: 102.
- 100 van PELT W J J, OERLEMANS J, REIJMER C H, et al. Simulating melt, runoff and refreezing on Nordenskiöldbreen, Svalbard, using a coupled snow and energy balance model[J]. The Cryosphere, 2012, 6(3): 641-659.
- 101 VERJANS V, LEESON A A, STEVENS C M, et al. Development of physically based liquid water schemes for Greenland firn-densification models[J]. The Cryosphere, 2019, 13(7): 1819-1842.
- 102 JUNG T, MATSUEDA M. Verification of global numerical weather forecasting systems in polar regions using TIGGE data[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142(695): 574-582.
- 103 ROEMMICH D, GILSON J. The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo program[J]. Progress in Oceanography, 2009, 82(2): 81-100.

Process in the study of ice cover and snow surface energy balance in the Arctic

Zou Xiaowei^{1,2,3}, Yang Diyi^{2,4}, Tian Biao², Zhang Lei², Sun Weijun³, Li Zhao¹, Ding Minghu²

(¹GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

²Institute of Global Change and Polar Meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

³College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

⁴Haining Meteorological Bureau, Haining 314400, China)

Abstract

Land-atmosphere interaction processes, especially glacier/snow surface albedo variations, are key scientific issues that restrict the understanding of rapidly changes (e.g., surface temperature rising, sea ice and snow extent decreasing) in the Arctic. This study, on the basis of recent improvements of observation techniques and analysis methods, shows the marked progress achieved in characterizing the Arctic glacier/snow surface energy balance. However, due to lack of the observation data with high quality, the robustness of the parameterization schemes and dataset with remote sensing/numerical models should be further evaluated. Therefore, longer time series of comprehensive observations, at more numerous and densely distributed observation sites, are needed for future surface energy balance studies. In addition, multi-source satellite remote sensing monitoring systems should be developed to acquire large scale, three-dimensional, dynamic, and continuous datasets, for evaluation and validation of remote sensing products and complex parameterization schemes. Such data will also allow for better characterization of the mechanisms influencing the Arctic glacier/snow surface energy balance and of sea ice/snow/atmosphere interactions, thus representing an important contribution to polar cryosphere and climate change research.

Keywords surface energy balance, ice-atmosphere interaction, Arctic, solar radiation, turbulent fluxes