

北极斯瓦尔巴德地区近地层大气观测研究 I. 平均场特征

刘宇¹ 胡非¹ 邹捍¹ 陆龙骅²

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 利用“中国科学探险协会2002年北极科学探险考察”期间, 在斯瓦尔巴德地区政府所在地朗伊尔宾城架设的两个自动气象站记录的气象资料, 分析了该地区气象要素平均值的日变化, 给出了这一极端环境区夏季近地层气象要素的基本物理图像: 太阳辐射、大气温度、地表温度和大气湿度等气象要素的日变化都呈单峰分布; 地气温差因地而异, 不同下垫面类型大气能量的源汇不同; 局地环流多种多样, 冰川风、海陆风、山谷风相互叠加, 主导风向各地不一。

关键词 北极 近地层大气 平均场 观测研究

文章编号 1006-9585 (2005) 01-0092-09 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

An Observation Study of the Surface Layer Atmosphere at Svalbard Area of Arctic. Part I: Characteristics of Mean Fields

LIU Yu¹, HU Fei¹, ZOU Han¹, and LU Long-Hua²

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract With the observation data of the surface layer atmosphere by two automatic weather station at Longyearbyen, the capital of Svalbard, which were obtained during the “China Association for Scientific Expedition’s Arctic Scientific Expedition 2002”, we studied the diurnal variations of some atmospheric factors in this area. The results show that the variations in summer in such extreme environmental areas are all in unimodal distribution and that the energy source/sink varies with different areas and that there are many kinds of local winds affecting between each other.

Key words Arctic, surface layer, mean fields, observation study

1 引言

随着地球系统科学的提出, 大气与陆地、海洋等其他系统的相互作用愈加引起人们的重视。全球变化是通过大气与地球表面的相互作用来响

应和实现的, 大气边界层在交换过程中发挥桥梁作用, 气候异常也往往潜伏着地气之间物质和能量交换的异常表现。

由于缺乏有效的观测资料, 人们对一些极端气候区大气边界层的研究和认识还很不足, 特别是北极地区大气边界层特征。北极地区是指

收稿日期 2004-01-18 收到, 2005-01-27 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233030、40352001、40333032 和中国科学院大气物理研究所留所博士启动基金 8-0320

作者简介 刘宇, 男, 1975 年出生, 博士, 助研, 主要从事大气边界层观测试验和理论研究. E-mail: liuy@mail.lapc.ac.cn

北极圈以北的广大地区，包括北冰洋，诸多岛屿，以及亚、欧、北美大陆北部的苔原带和部分泰加林带，面积为 2 100 万 km²，约占地球总面积的 1/25，其中陆地和岛屿面积占 800 万 km²，全部归属于 8 个环北极国家，但北冰洋仍属国际公共海域。

北极系统作为地球系统的一部分，它直接影响全球尺度的大气环流、大洋环流和气候变异，因而成为全球气候变化的驱动器之一^[1]。由于北极地区的气候环境变化直接影响到我国的气候与环境变化^[2,3]，因此关系到我国未来国民经济的可持续性发展。但是，因其恶劣的气候环境条件，使得北极观测资料极为贫乏，康建成等^[4]利用截止到 1997 年 9 月的有关南北极地区地理信息系统的光盘，检索到的与“北极地区”、“环境”、“海冰”3 个主题词有关的文献总共才有 246 篇；另外又通过查阅学术期刊以及与有关研究者交流，也仅仅查到 40 多篇文献，其中关于北极地区大气边界层的研究更是寥寥无几。

过去北极大气边界层的研究多集中在对北冰洋海冰下垫面的研究^[5~10]，其中少有的北极陆地下垫面大气边界层的研究也主要集中在格陵兰岛和冰岛地区^[11]，至于斯瓦尔巴德群岛地区（74~81°N，10~35°E）大气边界层的研究更是非常少见^[12]。毗邻格陵兰岛的斯瓦尔巴德地区由于受到北大西洋暖流的分支——挪威洋流的影响，气候比同纬度地区较为温和；而且因来自低纬度的暖气团和寒冷的北极气团不断交锋，造成该地区气温的剧烈波动，“冬雨夏雪”现象时有发生。因而斯瓦尔巴德群岛地区与格陵兰冰盖相比，在小环境上有一定的差异。

2002 年 7 月 25 日~9 月 9 日，中国科学探险协会组织了我国科学家对北极斯瓦尔巴德地区的气候、环境、资源、生物等方面进行了一个多月

大规模的综合科学考察。在考察中，中国科学院大气物理研究所、北京大学环境科学中心和中国气象科学研究院等单位的科学家们，利用多种科学仪器，获得了该地区大量的边界层气象资料。

2 观测地点和观测内容简介

中国科学探险协会 2002 年北极科学探险考察站设立在斯瓦尔巴德地区政府所在地朗伊尔宾，大气科学组选定一处由冰川溶冻作用形成的辫状河谷河滩地为主观测点（78°11'N，15°55'E，海拔高度 11 m）。该河谷呈东北—西南走向，下垫面为极地苔原，植被为季节性草甸，粗糙度为几到十几厘米，宽度大于 5 km，视野比较开阔。

观测内容主要包括：近地层常规气象要素平均量观测，使用仪器是由芬兰 VAISALA 公司研制的两套便携式自动气象站（MAWS201），该仪器于 2001 年初进口，各感应器出厂前均作过严格的标定，其观测项目和仪器性能指标参见文献^[13]。根据预考察期间确定的试验目的和实际考察期间具体试验场地的选取，观测分为 2 个阶段进行。第 1 阶段的观测目的主要是了解朗伊尔宾地区夏季冰川风的变化规律。MAWS2 设在朗伊尔宾城镇南面山上一号冰川冰线上部的一小片岩石裸露区，下垫面为泥沙、碎石堆积。冰川南高北低，其坡度约为 30°，由于太阳辐射等原因，冰川融化严重。MAWS1 则设在山脚下冰川融化形成的南北走向的河谷里，下垫面是密集排列的鹅卵石。第 2 阶段的观测则主要是为了考察北极地区山谷风的变化。MAWS2 设在朗伊尔宾城镇东南 10 km 以外的小山坡上，下垫面是冰川消退后形成的冰积垆，生有季节性草甸。MAWS1 则设在山坡的西南方向本次大气考察的主观测点。各个观测站点的具体位置见表 1。

表 1 2002 年北极科考常规气象要素观测点具体位置
Table 1 Locations of conventional observation station for Arctic Scientific Expedition 2002

观测时间 Time	观测目的 Purpose	仪器 Instrument	地点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude	高度 Altitude/m
第 1 阶段 First period (2002-07-30~2002-08-20)	冰川风	MAWS1	河谷	15°35'06"E	78°12'08"N	128
		MAWS2	冰川	15°31'28"E	78°11'14"N	357
第 2 阶段 Second period (2002-08-24~2002-09-02)	山谷风	MAWS1	河滩	15°54'28"E	78°11'02"N	12
		MAWS2	山坡	16°01'49"E	78°19'51"N	264

近地层大气辐射平衡观测，使用美国 EPP-LEY 公司生产的 M-PSP 短波辐射表和 M-PIR 长波辐射表，观测总辐射、反射辐射、地面长波辐射和大气逆辐射，其观测结果用澳大利亚 DE 公司生产的 Data taker 采集和自动保存。仪器架设在冰川河谷河滩地距离地面 1.5 m 处，观测时段为 7 月 31 日至 9 月 2 日，采样频率为 10 min。

近地层动力和热力结构观测，使用中国科学院大气物理研究所研制开发的湍流实时同步梯度观测系统。该系统由安装在简易铁塔上的两台 UAT-1 型超声风速温度仪组成，它们的架设高度分别是距离地面 3.5 m 和 8.0 m，采样频率为 10 Hz。从 8 月 1 日~9 月 2 日对北极冰川河谷大气近地层的大气温度和风速脉动等进行了连续观测。

近地层大气湍流及物质平衡观测，使用的仪器包括日本 KAIJO 公司生产的 DA-600-3T 超声风速温度脉动仪，美国 LICOR 公司生产的 LI-7500 红外水汽、二氧化碳脉动仪，美国热电子公司生产的 TE49C 臭氧分析仪，以及加拿大 UNISEREACH 生产的 LOZ-M 臭氧分析仪等，其架设高度为 1.8 m，获取了从 8 月 1 日~9 月 2 日频率为 20 Hz 的大气温度、三维风速、水汽、二氧化碳和地面臭氧等连续的脉动资料。

在试验前对各观测仪器都做了标定，在观测期间和试验后还对各辐射表做了订正。另外，在观测期间，我们还将 MAWS 观测到的辐射资料与 M-PSP 短波辐射表和 M-PIR 长波辐射表观测到的数据进行了水平比较，另外将 MAWS 观测到的风速资料与 UAT-1 型超声风速温度仪观测

到的风速和气温进行了比对。结果表明，不同仪器对同一气象要素的感应能力非常一致（图略），因而可以从一个侧面排除仪器在运输中发生了性能改变，我们的仪器能够很好的记录北极地区近地层气象要素的基本特征，所得观测资料是真实可靠的。

3 观测结果

本文主要通过两个时段不同观测站点自动气象站观测资料的分析，给出北极斯瓦尔巴德群岛朗伊尔宾地区近地层各气象参数的平均日间分布物理图像，以增加人们对该地区大气边界层的认识。

3.1 日照时数的日变化

研究气象要素的日变化，就是要研究气象要素的日夜分布规律。但北极朗伊尔宾地区地处 78°13'N 的高纬地区，观测试验期间大部分时间属于极昼阶段，所以将极昼消失前后分开来讨论气象要素的日变化是有必要的。

太阳高度角 $h_{\odot}$ 是描述太阳辐射日变化的一个常用物理量，也是划分昼夜的重要参量，它由下式计算^[14]

$$\sin h_{\odot} = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \tau, \quad (1)$$

式中， δ 是太阳赤纬角，即日地中心的连线与赤道面之间的夹角； φ 为当地的地理纬度； τ 为当时的太阳时角。

由上式计算得出朗伊尔宾地区太阳高度角 2002 年的分布情形如表 2 所示。可以看出，该地

表 2 北极朗伊尔宾地区 2002 年太阳高度角分布
Table 2 Distribution of solar altitude angle at Longyearbyen in 2002 (°)

日期	时间 Time												
	1200 *	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400
2002-02-17	-0.36	-0.75	-1.89	-3.71	-6.09	-8.87	-11.88	-14.92	-17.8	-20.31	-22.26	-23.5	-23.92
2002-02-18	0	-0.39	-1.53	-3.35	-5.73	-8.52	-11.53	-14.57	-17.45	-19.95	-21.9	-23.14	-23.56
2002-04-21	23.5	23.08	21.84	19.89	17.39	14.51	11.47	8.46	5.67	3.29	1.47	0.33	-0.06
2002-04-22	23.84	23.42	22.18	20.23	17.72	14.85	11.8	8.79	6.01	3.63	1.81	0.67	0.28
2002-08-22	23.68	23.26	22.02	20.07	17.56	14.69	11.65	8.64	5.85	3.47	1.65	0.51	0.12
2002-08-23	23.34	22.92	21.68	19.73	17.23	14.36	11.31	8.3	5.52	3.14	1.31	0.17	-0.22
2002-10-24	0.16	-0.23	-1.37	-3.2	-5.58	-8.36	-11.37	-14.42	-17.29	-19.79	-21.74	-22.98	-23.4
2002-10-25	-0.19	-0.58	-1.72	-3.54	-5.92	-8.7	-11.71	-14.76	-17.63	-20.14	-22.09	-23.33	-23.75

* 所列时刻为当地夏令时时间。Time above is local daylight saving time.

区 2002 年极夜从 10 月 25 日至 2 月 17 日共 116 天, 极昼从 4 月 22 日至 8 月 22 日共 123 天。尽管分阶段进行观测的主要目的是为了分别研究该地区冰川风和山谷风的变化规律, 但是, 近地层气象要素两个阶段的观测恰好各处于极昼期间和极昼消失以后, 从而可以找出两个阶段气象要素日变化的差异。

3.2 太阳辐射日变化

图 1 是北极朗伊尔宾地区太阳辐射的日间分布。可以看出, 不论是总辐射还是净辐射, 也不论是在极昼期间抑或是极昼消失之后, 辐射值均呈单峰分布, 峰值均出现在当地夏令时 10~16 时之间。另外, 由于朗伊尔宾地处高纬地区, 辐射强度极其微弱, 总辐射的日间最大值约为 $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 净辐射的峰值约为 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

所不同的是, 在第一阶段即极昼期间, 总辐射和净辐射 24 h 内均大于 0, 说明边界层大气是

热源, 不间断的加热下垫面, 为当地冰川的融化和植物的生长提供能量。而极昼消失以后, 总辐射在夜间变为 0, 净辐射则变为负值, 且净辐射小于 0 的时间长于总辐射为 0 的时间, 即在日出之后和日落之前河滩下垫面已经变为热源, 释放能量来加热近地层大气。但就全天而言, 净辐射的总和依然大于 0, 也就是说, 总体上还是大气向陆地传输热量。

另外值得指出的是, 由于朗伊尔宾地区纬度较高, 人烟稀少, 空气较为洁净, 致使净辐射受总辐射的影响也比较显著, 二者在冰川与河滩地的相关系数分别为 0.995 和 0.983, 略小于珠峰地区的相关数值。河滩地的相关性小于冰川上的值, 可能有两方面的原因, 一是由于河滩离人类活动较近, 其西南方向的公路和小煤矿可能造成当地的大气污染而影响净辐射对太阳总辐射的响应; 二是由于极昼的消失造成太阳总辐射的强迫在夜间变化不明显 (保持恒定 0) 从而降低其对净辐射的相关影响。

3.3 地表温度和大气温度日变化

太阳辐射的强弱直接影响地表温度和大气温度的日变化, 同时, 下垫面性质的不同对地表温度等的影响也非常明显。图 2 给出了 4 个不同地点 0 cm 地表温度和 1.5 m 高度处大气温度的日变化, 其中依次分别表示冰川下游的河谷、朗伊尔宾一号冰川、城镇东南 10 km 处山坡和辫状河谷河滩地的观测结果, 各自的具体位置参见表 1。

从图中可以看出, 各观测点的地表温度和大气温度都呈单峰分布, 其峰值也都是出现在太阳辐射增大以后, 滞后太阳辐射约 2 h, 也就是说, 地面温度和大气温度的峰值出现在当地夏令时间每天的 12~18 时。另外, 4 个测站的大气温度日变化幅度都不大, 气温日较差都小于 3°C 。

地表温度的日变化与下垫面性质关系密切。河谷站架设在朗伊尔宾一号冰川融化冲击形成的河谷内, 下垫面是密集排列的鹅卵石, 尽管其距离冰川融水形成的河流比较近 (约 10 m), 但其沙石下垫面的热容量比较小, 响应太阳辐射的速度比较快, 又由于观测时段处于极昼期间, 地表温度一直高于大气温度, 两者温度差在辐射较强时可以大于 2°C , 在辐射较弱时二者相差无几。冰川站架设在在一号冰川冰线以上的小片裸露岩石

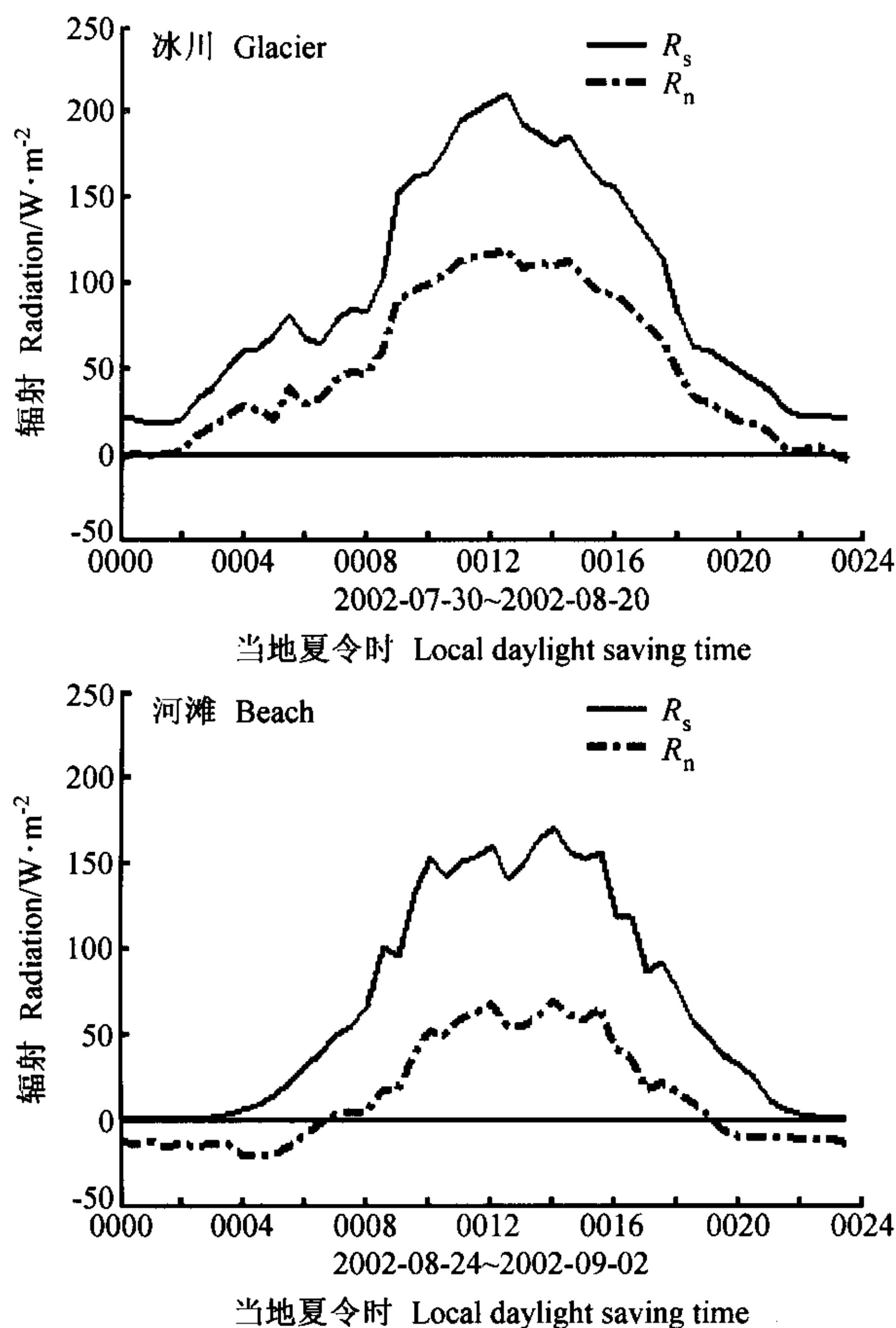


图 1 北极朗伊尔宾地区平均总辐射 (R_s) 和净辐射 (R_n) 日变化

Fig. 1 Diurnal variation of global radiation (R_s) and net radiation (R_n) at Longyearbyen

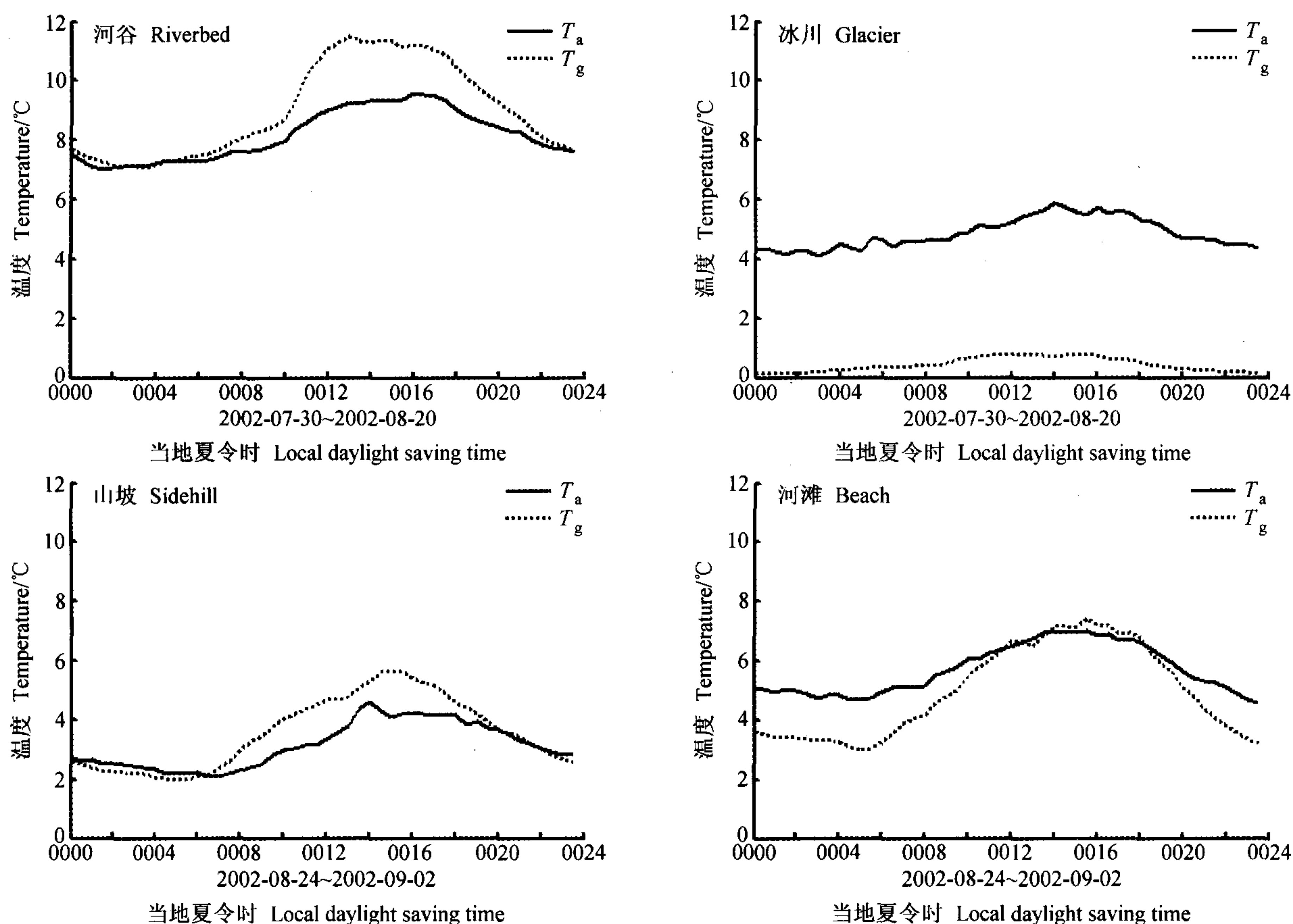


图2 北极朗伊尔宾地区各测站平均地表温度 (T_g) 和平均大气温度 (T_a) 日变化

Fig. 2 Diurnal variation of ground surface temperature (T_g) and air temperature (T_a) for each observation station at Longyearbyen

区,下垫面表层是刚刚融化的泥沙、碎石,再往下则是永冻带,地表吸收的太阳辐射能全部用来融化其下面的冰,而不能造成自身的温度升高,所以地表温度一直徘徊在 $0\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。值得注意的是,相同时段的观测,冰川站与河谷站的地气温差截然不同,其地表温度全天一直低于气温 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,从而导致陆气之间能量交换方向相反,所以在模拟北极地区陆气相互作用时,应该充分考虑因下垫面性质的差异所造成的不同效应^[15]。由于冰川站处于广阔的冰川之中,观测结果显示冰川气温的日波动比较小,日较差也只有 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

山坡站架设在城镇东南的小山坡上,下垫面是冰川消退后形成的冰积垅,山坡坡度不大,地面比较干燥,植被稀少,土壤比热小。地表温度在 07 时以前低于气温,存在弱的逆温层;随着辐射强度的增加,07 时以后逆温层消失,混合层开始发展但强度不大;混合状态持续到 20 时,由于太阳辐射的减弱,地表温度又降低到与气温相一

致的水平,大气处于中性层结状态。而处于辫状河谷河滩地的大气主观测点的河滩站,由于海拔高度较低,下垫面属于生有季节性草甸的湿地苔原地带,地表热容量比较大。尽管该观测点比山坡站低 200 多米,但其地表温度的日间波动也并不比山坡站的大,只是对应时间的温度稍高于山坡站。另外,河滩站逆温强度比山坡站的强,逆温持续时间也比山坡站的长,仅仅是在 14~17 时地表温度稍高于大气温度,其余时段均被逆温层控制,大气热力稳定,地表从大气吸收热量。总而言之,不同性质的下垫面地气之间热量源汇有别,十分复杂,不能一概而论。

3.4 大气湿度日变化

图 3a 分别给出了北极朗伊尔宾地区 4 个不同观测站点 1.5 m 高度处大气相对湿度的日变化曲线。从图中可以看出,北极朗伊尔宾地区空气的相对湿度比较大且其日变化幅度较小,各个观测站点的相对湿度日较差都小于 20%,尤其是冰川

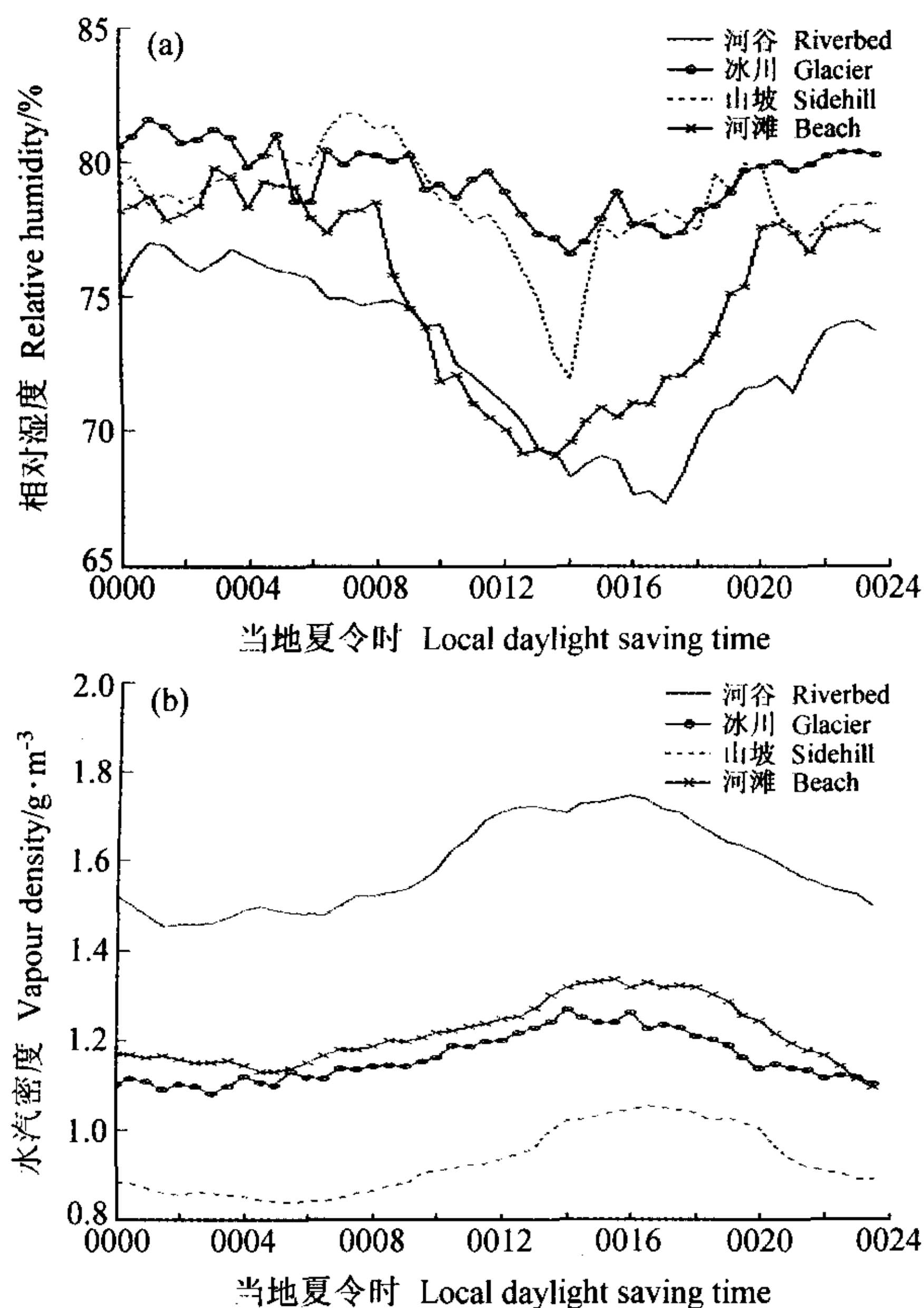


图3 北极朗伊尔宾地区各测站平均大气相对湿度 (a) 和平均大气水汽密度 (b) 日变化

Fig. 3 Diurnal variation of relative humidity (a) and air vapour density (b) for each observation station at Longyearbyen

之上的相对湿度在极昼期间基本上保持不变。

相对湿度表示空气接近饱和状态的程度，受大气温度的影响极大，不能很好地揭示空气湿度的真实大小和变化趋势。于是，为了更好地表示空气湿度的绝对变化量，本文将相对湿度 R_H 转换为空气的水汽密度 (ρ_v)，具体计算方法如下：

$$q_s = \frac{622 \times 6.11 \exp\left[\frac{a(T-273.15)}{T-b}\right]}{P - 0.378 \exp\left[\frac{a(T-273.15)}{T-b}\right]}, \quad (2)$$

$$q = R_H \cdot q_s, \quad (3)$$

$$\rho = p/RT, \quad (4)$$

$$\rho_v = \rho q, \quad (5)$$

式中 q_s 、 q 是饱和比湿与比湿； p 是气压； T 是大气温度； a 、 b 是常数，这里取 263 K 作为水相和冰相的分界温度^①，即当 $T > 263$ K 时， $a = 17.26$ ， $b = 35.86$ ，当 $T < 263$ K 时， $a = 21.87$ ， $b = 7.66$ ； ρ 、 ρ_v 分别是大气密度和水汽密度； R_H 是

相对湿度， R 是干空气气体常数，取值为 $287.04 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

计算结果如图 3b 所示。可以看出，北极朗伊尔宾地区空气中水汽密度呈单峰分布，峰值出现在中午 12 时以后，这与气温和辐射等的变化趋势相一致。计算河谷站、冰川站、山坡站和河滩站 4 个观测点大气温度与水汽密度的相关系数，它们依次分别为 0.9917、0.9905、0.9678 和 0.9606。

3.5 大气风速日变化和风向分布

由于北极太阳辐射较弱，近地面大气温度日变化幅度不大，又由于地形不均匀所造成的温度梯度不明显，所以造成朗伊尔宾地区的风速较小且日变化缓慢，各个观测站点的风速具体日间分布如图 4 所示。

从图中可以看出，尽管各观测站平均风速全天都徘徊在 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间，但由于地形分布和下垫面性质的差异，导致各地局地环流各有不同，具体表现在风速的 u 、 v 分量日变化的差异上。

冰川号站风速的日变化比较简单，各风速分量都为正值且南风分量始终大于西风分量。究其原因，是因为该观测站架设在朗伊尔宾城镇南面偏西的冰川上，冰川坡度南高北低，高处冷空气沿冰川坡面下沉形成沉降风。从理论上讲，这种沉降风应该时刻存在，冰川沉降风成为该地的主导气流。

河谷站处于冰川底部末端以外的河谷中，向上和向下各约 2 km 分别是冰川和海湾，左右即东西两边不远处有相对高度约 200 m 的小山坡，可以说地形比较复杂，与之对应，该处的环流也比较复杂。当地时间 08~18 时，该地风速以来自北偏东的海风为主，其余时间则以来自南偏西的冰川沉降风为主。冰川沉降风是冰川站主导气流的延续，至于海风的形成，主要是由于在 08~18 时之间，太阳辐射相对其余时间较强，沙石下垫面的河谷大气温度增加较快，而冰水混合的海水下垫面上的大气温度增加较慢，由海面指向河谷观测站的温度梯度超过了由上部冰川指向河谷处的温度梯度，即海面上的大气密度与河谷站处的大

① 丁一汇，天气动力学中的诊断分析方法，中国科技大学研究生院，1993，293

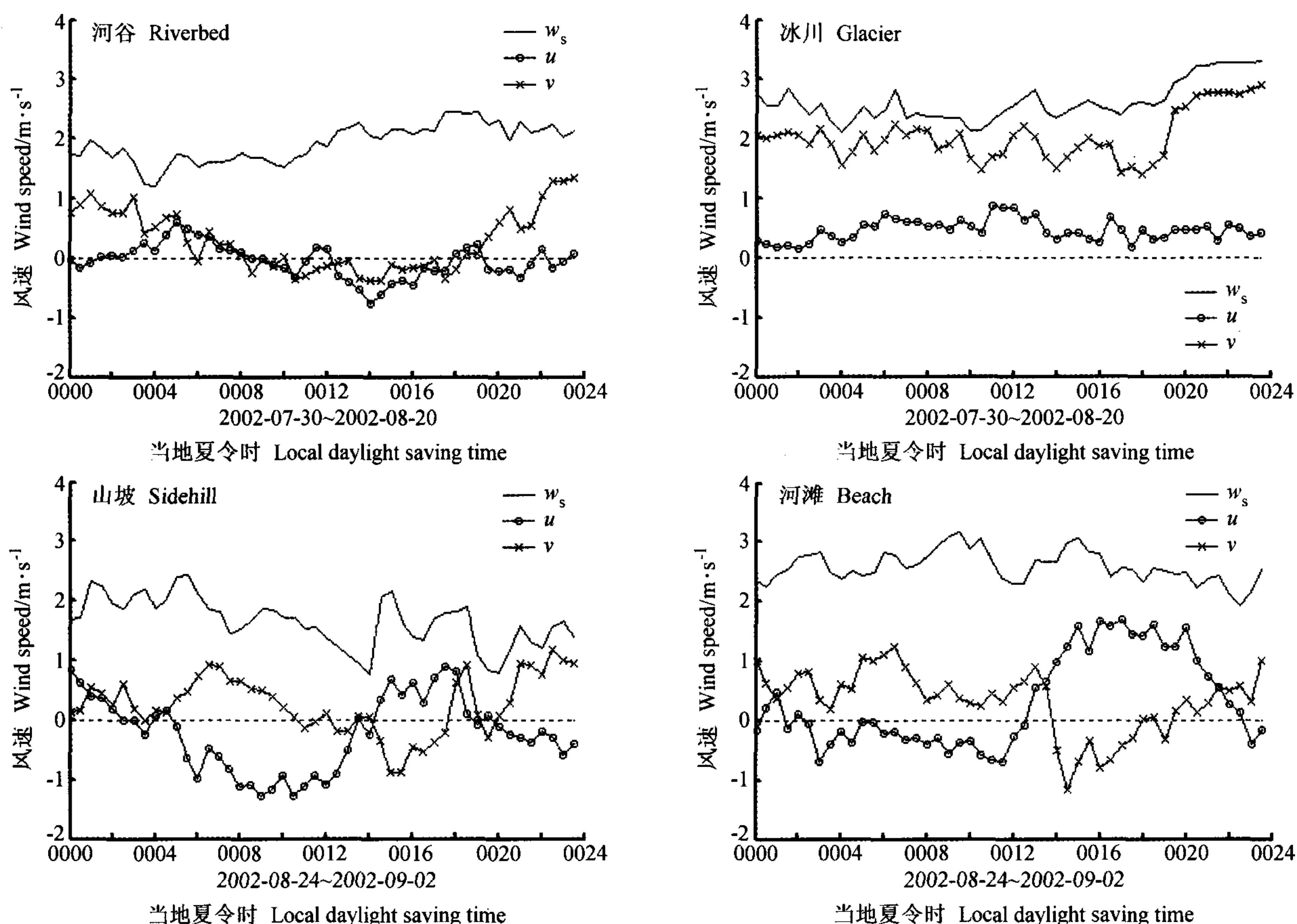


图4 北极朗伊尔宾地区各测站大气平均风速(w_s)及其分量(u 、 v)日变化

Fig. 4 Diurnal variation of wind speed (w_s) and its components (u and v) for each observation station at Longyearbyen

气密度之差超过了冰川上与该处的大气密度之差,从而形成海风。该观测点除了主导风向的海陆风和冰川风以外,由于东西两边山峰夹峙,日间还形成少量的下山风。

河滩站位于东南—西北走向的辫状河谷中,与河谷站位置相似,其向上东南方向是架设MAWS2的小山坡,其向下西北方向是朗伊尔宾海湾,所以其主要风速环流是山谷风与海陆风的正向叠加,即14~22时是来自西北方向和西南方向的海风和谷风,其余时间则主要是来自东南方向的山风或是陆风。山坡站处在半山腰处,其主导风向是来自东南山顶的下山风, v 分量只在14~18时出现负值,即谷风持续时间较河滩处的要短。

为了更直观地描述各观测站不同方向全天所占份额的差异,图5给出了各站点的风向玫瑰图。如上所述,各点的风向分布主要取决于各自地形的差异。

4 总结与讨论

北极朗伊尔宾,不论是在极昼期间还是在极昼消失以后,太阳辐射、大气温度、地表温度和大气湿度(水汽密度)等气象要素的日变化都呈单峰分布,相互之间存在较好的相关性。具体结论如下:

(1) 北极地区极昼后期和极昼消失的前期,太阳辐射较弱,当地正午时分总辐射最大值仅为 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,净辐射与总辐射之间相关性强。

(2) 大气温度各地全天都低于 10°C 且日较差小于 3°C ,地表温度受下垫面性质影响大,地气温差因地而异,各地大气能量的源汇不同。

(3) 北极陆地地区夏季由于气温较低,尽管大气相对湿度较高,空气近于饱和,但水汽密度较小。

(4) 不同观测点大气风速较小,但由于地形

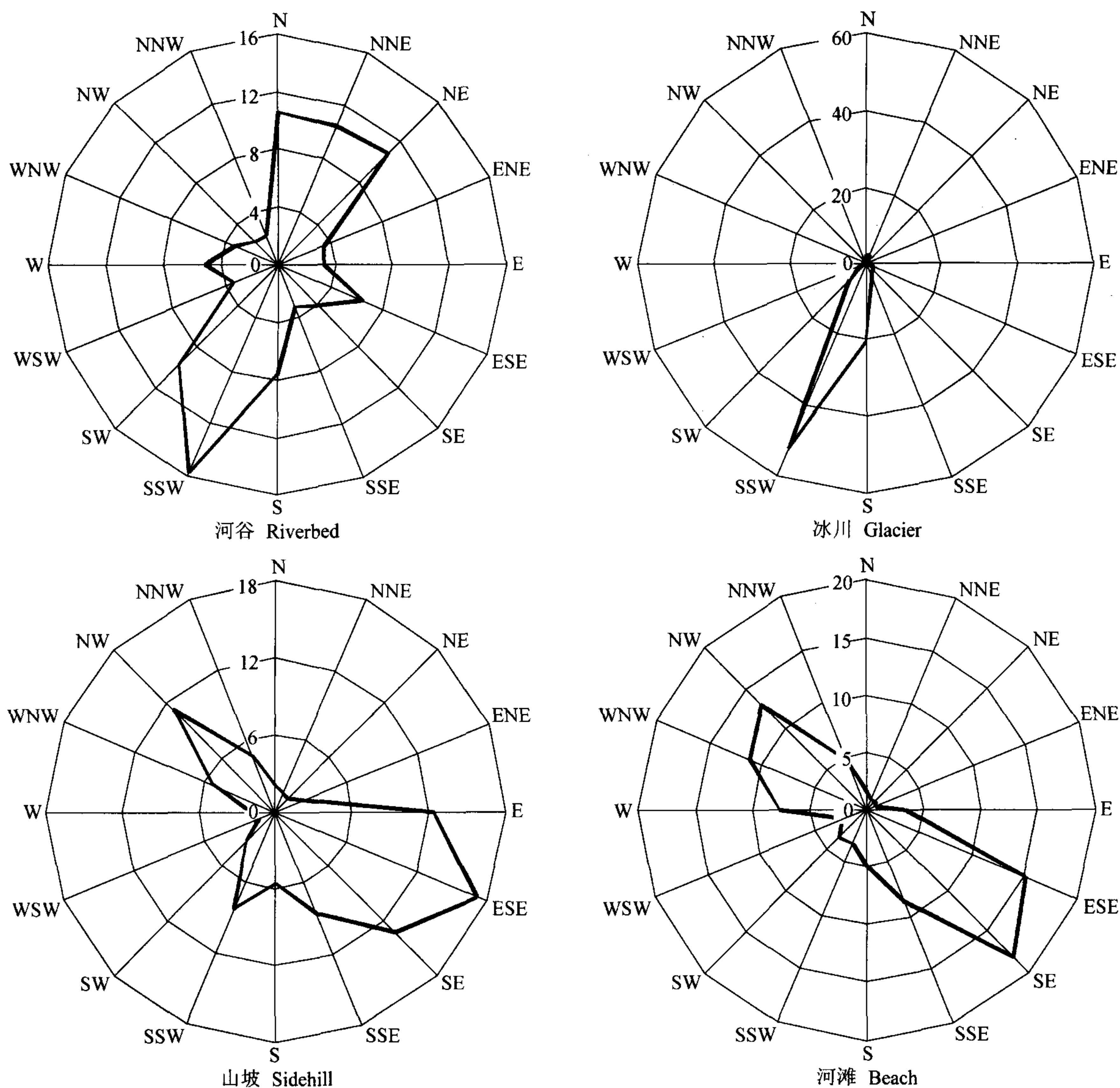


图 5 北极朗伊尔宾地区各观测站点大气平均风向玫瑰图

Fig. 5 Rose plot of wind direction for each observation station at Longyearbyen

复杂，局地环流多种多样，冰川风、海陆风、山谷风相互叠加，主导风向各地不一。

致谢 中国科学院大气物理研究所高登义研究员和王维高级工程师为资料的采集付出了辛勤劳动，作者在此表示诚挚的感谢。

参考文献

[1] 康世昌, 姚檀栋, 秦大河, 阎宇平. 北极 Svalbard 地区气候变化特征及其与青藏高原对比. 地理科学, 1998, 18 (4): 312~319

Kang Shichang, Yao Tandong, Qin Dage, Yan Yuping. Characteristics of climatic change in Svalbard in the Arctic and comparison with the Qinghai-Xizang Plateau. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 1998, 18 (4): 312~319

[2] 高登义, 武炳义. 北半球海-冰-气系统的 10 年振荡及其振源初探. 大气科学, 1998, 22 (2): 137~144

Gao Dengyi, Wu Bingyi. Preliminary study on decadal oscillation and its oscillation source of the sea-ice-air system in the northern hemisphere. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, 2 (2): 137~144

[3] 王春红, 蒋全荣, 余志豪. 北极 III 区海冰面积低频变化对北半球冬季大气环流异常的作用. 大气科学, 1997, 21 (1): 123~126

Wang Chunhong, Jiang Quanrong, Yu Zhihao. Effect of

- the low-frequency variability of the region III Arctic sea ice cover upon the northern hemisphere atmosphere general circulation anomaly in winter. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21** (1): 123~126
- [4] 康建成, 颜其德, 孙波, 等. 北冰洋海冰/气候系统及其对全球气候的影响. 极地研究, 1999, **11** (4): 301~310
Kang Jiancheng, Yan Qide, Sun Bo, et al. The Arctic sea ice, climate and its relation with global climate system. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 1999, **11** (4): 301~310
- [5] Brummer B. Boundary layer mass, water, and heat budgets in wintertime cold-air outbreaks from the Arctic sea ice, *Monthly Weather Review*, 1997, **125** (8): 1824~1837
- [6] Steiner N, Markus H, Peter L. Sea-ice roughness and drag coefficients in a dynamic-thermodynamic sea-ice model for the Arctic, *Tellus*, 1999, **51A** (5): 964~978
- [7] Duynkerke P G, De Roode S R. Surface energy balance and turbulence characteristics observed at the SHEBA Ice Camp during FIRE III, *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D14): 15313~15322
- [8] 曲绍厚, 胡非. 北冰洋海域极昼期间海-冰-气间湍流通量交换特征. 自然科学进展, 2002, **10** (9): 836~841
Qu Shaohou, Hu Fei. Characteristics of eddy flux exchange between sea-ice-air over the Arctic ocean during the polar day period. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2002, **10** (9): 836~841
- [9] 曲绍厚, 胡非, 李亚秋, 苏林. 北冰洋及其邻近海域极昼期间大气边界层结构特征试验研究. 地球物理学报, 2002, **45** (1): 8~16
Qu Shaohou, Hu Fei, Li Yaqiu, Su Lin. Experiment research on the characteristics of ABL structure over the Arctic ocean and adjacent sea area during the polar day period. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2002, **45** (1): 8~16
- [10] 周立波, 刘宇, 邹捍. 北极地区楚克奇海域一次强逆温过程的分析. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 188~195
Zhou Libo, Liu Yu, Zou Han. An analysis of a strong temperature inversion process over the Chukchi Sea region in Arctic. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (2): 188~195
- [11] Lloyd C R, Harding R J, Friberg T, et al. Surface fluxes of heat and water vapour from sites in the European Arctic, *Theoretical and Applied Climatology*, 2001, **70**: 19~34
- [12] Brummer B, Rump B, Kruspe G. A cold air outbreak near Spitsbergen in springtime: boundary-layer modification and cloud development, *Boundary-Layer Meteor.*, 1992, **61**: 13~46
- [13] 刘宇, 周立波, 邹捍, 等. 青藏高原珠峰地区绒布河谷大气近地层观测研究. 高原气象, 2004, **23** (4): 512~518
Liu Yu, Zou Han, Hu Fei. Observation study on atmospheric surface layer in Rongbu Valley in Zumolama Peak area in Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (4): 512~518
- [14] 王永生. 大气物理学. 北京: 气象出版社, 1987, 165~167
Wang Yongsheng. *Atmospheric Physics*. Beijing: China Meteorological Press, 1987, 165~167
- [15] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. *Climate models-evaluation, Climate Change*. London: Cambridge University Press, 1995