气候与环境研究 Climatic and Environmental Research Vol. 10No. 2June2005

北极斯瓦尔巴德地区近地层大气观测研究 II. 湍流场特征

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"期间在北极朗伊尔宾地区获得的大气风温微
 气象脉动资料,讨论了该地区近地层湍流能谱、湍流方差、感热通量、动量通量、温度结构参数以及动量整体
 输送系数等的分布规律,给出了这一极端环境区夏季近地层微气象场的基本结构,分析了北极地区极昼期间陆
 地下垫面地一气之间能量交换,丰富了人们对该地区近地层湍流输送过程的深入理解。
 关键词 北极 近地层大气 湍流场 观测研究

An Observation Study of the Surface Layer Atmosphere at Svalbard Area of Arctic Part II: Characteristics of Turbulence 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 The turbulence fields such as turbulence spectrum, eddy heat flux, temperature structure coefficient and bulk transport coefficient are studied in Lonyearbyen, the capital of Svalbard with the micrometeorology data observed by China Association for Scientific Expedition in 2002. It presents the basic structure of the micrometeorology fields in the extremely condition area in summer. The exchange of energy between land and atmosphere is also analyzed during polar days in the Arctic area. The results show the eddy transport process of surface layer in Arctic land area.

Key words Arctic, surface layer, turbulence field, observation study

1 引言

北极地区作为全球气候变化的驱动源之一, 直接影响着我国的气候与环境变化,关系到我国 未来国民经济的可持续性发展,国际上已经对北极地区展开了比较广泛的研究,我国科学家也正迎头赶上并积极参与到国际北极的研究行列中去^[1]。但是由于在我国政府组织首次北极考察之前已经组织了15次对南极地区的综合考察,致使

收稿日期 2004-02-20 收到, 2005-04-04 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大气湍流理论研究。E-mail: liuy@mail. lapc. ac. cn

气候与环境研究

Climatic and Environmental Research

人们对南北极的认识程度与国际上形成反差^[2]。 大气边界层内的运动是复杂的湍流运动,所 以研究大气边界层内热量和动量的湍流通量历来 是微气象学的一个重要方面。观测和研究北极地 一气物理过程,既可以了解北极这一特殊地区大 气边界层结构,又将有助于改进全球气候模式和 区域天气、气候模式在该地区的参数化方案。以 前的观测试验,由于受到当时科技水平的限制或 观测时间的不足,对北极尤其是斯瓦尔巴德地区 的风温结构微气象观测研究还不多见。

2002 年 8 月 1 日~9 月 2 日,即中国科学探 险协会组织的北极斯瓦尔巴德地区大规模综合科 学考察期间,我国大气科学工作者使用中国科学 院大气物理研究所自行研制开发的"湍流实时同 集中在高频部分, 谱线的基本形状大致保持不变; 而水平速度分量谱, 其低频部分受上游地形特征 的影响较大, 稳定层结下, 由于重力波等因素的 影响, 低频涡旋占有的能量明显增加^[8]。

图 1 为 2002 年 8 月 30 日 12 时(当地夏令时, 下同)在朗伊尔宾地区辫状河谷下垫面 8 m 高度 处观测到的风速各分量 u、v、w 和温度 T 的谱分 析个例,其中横坐标为自然频率 n,纵坐标为用各 相应量的方差标准化的能谱 E(n)。

从图中可以看出,在日间不稳定层结条件下, 朗伊尔宾地区各种气象要素的能谱高频段都符合 惯性副区的-5/3次方规律,说明这一频率范围内 的湍流是各向同性的。在谱的低频区域,水平风 速分量 *u*、*v* 的能量比垂直分量的能量约高出1个

步梯度观测系统"对北极冰川河谷大气近地层进 行了连续观测,获得了该地区大量的大气温度和 风速脉动等大气边界层微气象资料。观测仪器和 观测地点的描述详见文献 [3],本文旨在通过对 近地层大气湍流观测资料的分析,给出这一极端 环境区夏季近地层微气象场的基本结构,分析北 极地区极昼期间陆地下垫面地一气之间能量交换, 并提出新的边界层参数化方案,以改进各类时间 尺度的数值预报模式,进而为提高灾害性天气预 报等的准确率提供理论依据。

2 观测结果

2.1 大气湍流能谱特征

湍流能谱分析可以研究不同尺度涡旋对湍能 贡献的大小,大气近地层中,平坦均一下垫面风 速分量及温度能谱满足 Monin-Obukhov 相似性理 论。大气湍流能谱在高频区存在一个惯性子区, 在此区域内局地各向同性假设成立,表现为能谱 与频率的关系曲线在双对数坐标图中满足一5/3 次方规律,这已为过去大量观测结果所证实^[4]。 因此,湍流谱分析也是判断观测数据质量和检验 湍流是否各向同性的重要依据^[5]。近些年来对复 杂地形条件下的湍流结构已开展了一些观测研 究^[6,7],虽然随着地形条件的不同,谱的分布特征 互有差异,但较高频率的湍涡可以迅速适应局地 条件而实现平衡,均匀地形条件下谱的惯性副区 的有关研究结果仍适用,垂直速度谱的主要能量 量级,也就是说垂直速度分量的含能区包含更多 的高频涡旋,这与许多作者的研究结果是相同的。 由于观测地点在 78°13′N 的高纬地区,太阳辐射 较弱,再加上观测试验大部分时间处于极昼期间, 近地层大气层结稳定度日变化不大,使得观测到 的所有数据的能谱特征都十分相似,这也表明观 测数据是可靠的。

极昼消失以后,在夜间较为稳定的大气层结 条件下,低频区域的能谱强度相对白天有所降低, 高频区域能谱增加,尤以垂直速度最为明显(图 略)。对于温度谱,因夜间稳定层结时热力脉动较 弱,探头信噪比降低,由于噪声信号的折叠效应 而使得能谱高频段末端上翘。总之,中国科学院 大气物理研究所自行研制开发的 UAT-1 型大气 风温脉动仪能够很好地记录北极地区大气风速各 分量和超声虚温的脉动情况。

2.2 大气湍流方差特征

Monin-Obukhov 相似理论给出大气近地层中 风速各分量方差(σ_u 、 σ_v 、 σ_w)在用摩擦速度 (u_*)无量纲化以后,只是稳定度参数(z/L)的 函数,即

 σ_α/u_{*} = φ_a(z/L), α = u, v, w
 (1)

 式中, φ_a 为风速分量方差的普适函数, L 为 Monin-Obukhov 长度, u_{*} 是摩擦速度。
 6.02), U

 在近中性层结情况下(|z/L|<0.02), 近</td>

 地层大气湍流主要由机械生成,各向湍强近似为

 常数,即

$$\sigma_u = Au_*, \quad \sigma_v = Bu_*, \quad \sigma_w = Cu_*, \quad (2)$$

宇等:北极斯瓦尔巴德地区近地层大气观测研究 II. 湍流场特征 2期 刘 LIU Yu, et al. An Observation Study of the Surface Layer Atmosphere at Svalbard Area of Arctic. II... No. 2



2002 年 8 月 30 日当地夏令时 12 时北极朗伊尔宾地区近地层大气湍流能谱。(a) ~ (d) 分别为 u、v、w、T 的谱 图 Fig. 1 Turbulent energy spectrum of near surface layer atmosphere at daylight saving time 12 o' clock on August 30th, 2002, where is at Longyearbyen area, Arctic. (a) - (d) are the spectrum for u, v, w, T, respectively

式中A、B、C为常数。

当大气层结不稳定达到对流状态时,控制湍 流脉动以及相应引起的通量输送机制主要受控于 浮力因子,根据相似理论,无因次风速分量方差。 σ_a/u_* 与 z/L 满足 1/3 次方定律,即

$$\sigma_{\alpha}/u_{*} \propto \left(-z/L\right)^{1/3}, \ \alpha = u, v, w$$
 (3)

对于无因次温度脉动方差 σ_T/T_* ,在对流状 态下可以表示为

$$-/|T| + O(-/I)^{-1/3}$$
 (1)

不稳定大气层结条件下,无因次风速分量方差与 z/L 的关系满足 1/3 次方定律。图 2 中风速各分 量无因次方差 σ_{u}/u_{*} 与大气稳定度 z/L 的关系拟合 曲线为

177

$$\sigma_{u}/u_{*} = 3.03(1-1.092z/L)^{1/3}, (z/L < 0) \quad (5)$$

$$\sigma_{v}/u_{*} = 2.30(1-1.098z/L)^{1/3}, (z/L < 0) \quad (6)$$

$$\sigma_{w}/u_{*} = 1.36(1-1.797z/L)^{1/3}, (z/L < 0) \quad (7)$$

 $\sigma_T / | I_* | = \beta(z/L) ,$ (4)式中 β 为常数, T_* 为近地层特征温度尺度。 图 2 给出了朗伊尔宾地区近地层风速各分量 和大气温度无因次湍流方差 σ_{α}/u_{*} ($\alpha = u, v$, w)、 $\sigma_T/|T_*|$ 在不稳定大气层结条件下 (z/L) <0)的分布。 由图可见,无因次风速方差 $\sigma_u/u_* \, \sigma_v/u_*$ 、 σ_{u}/u_{*} 在近中性(|z/L| < 0.02)条件下接近于 常数,分别为A=3.03、B=2.30、C=1.36。在

过去,在平原地区风速分量方差与大气稳定 度的关系曾有过很多观测,在起伏地形上也做过 一些观测, Panofsky 等^[8]综合了过去一些观测结 果。比较发现,北极朗伊尔宾地区长有季节性草 甸的苔原地带上的 σ_w/u_* 值与过去平原地区和起 伏地形上的值很接近,尤其是与下垫面为荒漠草 原的青藏高原五道梁^[9]和美国南卡罗来纳州海滨 岛屿等地区的相差无几。 σ_u/u_* 与 σ_v/u_* 的值大于 平原地区,与起伏地形上的值比较接近,但低于

气候与环境研究 Climatic and Environmental Research



图 2 2002 年 8 月北极朗伊尔宾地区近地层无因次湍流方差在不稳定大气条件下的分布。(a) ~ (d) 分别为 u、v、w和 T 的方差 Fig. 2 Distribution for nondimensional turbulent variances of near surface layer atmosphere under unstable conditions in August, 2002 at Longyearbyen area. (a) — (d) are the variances for u, v, w, T, respectively

美国RockSpringsPA和青藏高原大部分地区的 值。值得指出的是, σ_w/u_* 值无论是北极苔原地 带、平原、起伏地形、甚至是山区观测的结果都 很接近,这说明地形作用对垂直方向的湍流运动 影响较小,而对纵向、横向水平湍流速度的影响 较大,也就是说,垂直方向气流可以较快的适应 地形,而水平方向则不然。

在稳定层结条件下, 朗伊尔宾观测资料表明, 当z/L < 0.07时, 风速各分量的方差 σ_{α}/u_{*} 保持 近中性的常数; 当z/L > 0.07时, σ_{α}/u_{*} 随着z/L的增大而增大, 具体如图 3 所示。 $\sigma_w/u_* = 1.36(1+0.787z/L)^{1/3}.(z/L>0)$ (10) 在稳定层结时,湍流运动的高频部分受到抑制,低频的间歇湍流、重力波等在强稳定条件下将起主导作用,造成 Monin-Obukhov 相似性假设成立的条件不易被满足。即使在平原地区,不同学者所得到的结果差异也很大,Panofsky 等^[8]给出 σ_w/u_* 在稳定层结时近似等于常数 1.25,其观测结果 σ_a/u_* 都随稳定度增大而减小。但是Caughey 等^[11]和 Davidson 等^[12]观测到,在稳定

从图 3 中还可以看出, 朗伊尔宾地区近地层 大气风速各分量无因次方差 σ_a/u_* 在稳定层结条件 下也符合 1/3 次方定律,这与青藏高原观测结果 相类似^[5,10],其拟合曲线分别为 $\sigma_u/u_* = 3.03(1+0.803z/L)^{1/3}, (z/L > 0)$ (8) $\sigma_v/u_* = 2.30(1+2.314z/L)^{1/3}, (z/L > 0)$ (9) 层结时, σ_w/u_{*} 随着 z/L 的增大而增大。因而, 至今人们对稳定层结情况下湍流运动特性的认识 还不充分,不少问题仍需进一步研究。另外,与 σ_w/u_{*} 相比, σ_u/u_{*} 和 σ_v/u_{*} 离散度较大,这是由 于水平风速方差更多的受到了低频扰动如地形等 的影响。

图 2d 和图 3d 分别给出了朗伊尔宾地区近地 层无因次温度脉动方差σ_T/ | T_{*} | 在不同大气层

2期 刘 宇等:北极斯瓦尔巴德地区近地层大气观测研究 II. 湍流场特征 No. 2 LIU Yu, et al. An Observation Study of the Surface Layer Atmosphere at Svalbard Area of Arctic. II... 179



图 3 2002 年 8 月北极朗伊尔宾地区近地层无因次湍流方差在稳定大气条件下的分布。(a) ~ (d) 分别为 u、v、w和 T 的方差 Fig. 3 Distribution for nondimensional turbulent variances of near surface layer atmosphere under stable conditions in August, 2002 at Longyearbyen area. (a) — (d) are the variances for u, v, w, T, respectively

结状况下的分布情况,可以看出其具有如下特点: (1) 随着大气层结不稳定性的增加 $\sigma_T / | T_* | =$ 减小趋势,也就是说随着热力湍流活动加强,地 气之间热量交换加快,气温脉动则减小;(2)层 结稳定时,热力湍流受抑制,地气之间热量交换。 缓慢,温度脉动即方差 σ_T 较大且随着稳定性的增 加也呈减小趋势,同时稳定层结增加了热通量测 量的不确定性, 使得 $\sigma_T / | T_* |$ 的分布比较离散; (3) 中性层结时, 一方面由于热通量接近于零难 于测量使得测量误差较大,另一方面由于中性层 结常出现在转换期而缺乏定常性^[13]等原因,造成 $\sigma_T / | T_* |$ 的观测结果离散性特别大。 另外,在不稳定层结下 $\sigma_T / | T_* | 随 z/L 变$ 化基本上满足-1/3 次方定律,即符合(4)式所 描述的规律。本文得出β值为1.08,介于平原地 区和高原地区的结果之间^[5,14]。

何得到近地层的热量和动量通量对于大气环流和 数值模拟是至关重要的。涡旋相关法是确定湍流 通量的直接法,被视为确定湍流通量和通用函数 的标准方法^[15]。图4给出了利用涡旋相关法计算 的朗伊尔宾地区犬气近地层感热通量 H 和动量通 量 r 的日变化。

可以看出, 朗伊尔宾地区感热通量呈明显的 单峰分布,每日的最大感热通量出现在当地夏令 时的12时,约为60W·m⁻²;谷值出现在00~04 时,且感热通量为负值,说明在该时段大气向地 面传输热量;但就全天而言,感热通量的日均值 为17.5W·m⁻²,表明该地区极昼期间陆地表面 是大气的热源。 另外值得指出的是,在感热通量为正值的时 段,利用3.5m高度的观测资料计算的感热通量 比用8m高度的计算结果稍大,在弱负值时段二 者重合得较好。这是由地气之间温度梯度的差异 造成的:夜间地面温度略低于大气温度,大气处 于稳定层结状态,热力驱动的垂直速度的脉动较

2.3 大气湍流通量特征

地气之间相互作用的一个重要过程是地球表 面同近地层大气之间热量和动量的传输,所以如

气候与环境研究 Climatic and Environmental Research



图 4 北极朗伊尔宾地区近地层感热通量 H (a) 和动量通量 τ (b) 的日变化

Fig. 4 Diurnal variation of sensible heat flux H (a) and momentum flux_{τ} (b) at Longyearbyen

小,不同高度之间大气温度的脉动差异相应的也 小;日间则恰恰相反,低层大气的垂直速度脉动 值要大于高层的脉动值,所以通量值也要大于高 层的观测结果,但差异不大,能够较好的符合常 通量假设,这也再一次说明了观测资料的可靠 性。

分析感热湍流通量如此微弱的原因,我们认为主要是由于其特殊的地理位置和特殊的下垫面条件决定的。观测地点处于 78°13′N 的高纬地区,

N•m⁻²,次峰值出现在 19 时,仅为 0.025 N•m⁻²。与感热通量日变化规律相似,动量通量的 小值区集中在 00~07 时。全天而言,8 m 高度 处的动量通量略小于 3.5 m 高度处的值,这是 因为下垫面对低层大气风速的影响较大,使得低 处大气的风速脉动较强,从而造成动量通量相应 较大。

2.4 大气温度结构参数特征

根据 Monin-Obukhov 相似理论,无因次温度

即使在夏季,太阳高度角依然很低,太阳辐射比 较弱且日变化不明显;同时由于下垫面是辫状河 谷的苔原带,周围是湿地沼泽并长有丰富的低矮 茅草,地面以下 80 cm 处即为永冻带,因此,下 垫面的热容量比较大,其响应微弱太阳辐射外强 迫的速度比较慢,地-气温差相对中低纬度地区比 较小,从而导致感热湍流通量较弱。 朗伊尔宾地区动量通量日分布有双峰现象, 主峰值出现在14时,3.5 m高度处约为0.055 结构参数 $C_T^2 z^{2/3} / T_*^2$ 是稳定度 z/L 的函数:

 $C_T^2 z^{2/3} / T_*^2 = f(z/L),$ (11)

式中 f 为温度结构参数的普适函数。图 5 给出了 朗伊尔宾地区无因次温度结构参数与稳定度之间 的关系。可以看出,在不稳定层结情况下,尤其 当z/L < -0.02时,函数 f 服从-2/3 次方规律。 函数 f 在朗伊尔宾地区的拟合结果为 $f = 4.80[1-6.5(z/L)]^{-2/3}, z/L \leq 0$ (12)

拟合系数为 4.80,与文献 [5、16] 的结果比较接近。

No. 2 LIU Yu, et al. An Observation Study of the Surface Layer Atmosphere at Svalbard Area of Arctic. II. 181

大气层结从不稳定过渡到中性时,温度结构 参数离散程度加大,但可以看到,无因次温度结 构参数 $C_{Tz}^{2/3}/T_*^2$ 值接近或超过 10。在大气层结 稳定时更加离散, $C_{Tz}^{2/3}/T_*^2$ 随稳定度的增加缓慢 下降,从稳定方向接近中性时其值也接近于 10, 但已不满足 2/3 次方规律,这与刘辉志等^[5] 的分 析结果类似。

在稳定层结时,温度结构参数的分布规律还 没有一个比较一致的看法,过去国外一些学 者^[12,17]的结果都显示 *C_Tz^{2/3}/T²*,值随 *z/L*值的增 大而增大,而我国学者则都得出相反的趋势^[5,18], 温度结构参数在稳定层结时究竟如何分布,还有 待于进一步研究。

朗伊尔宾地区近地层温度结构参数 C_T 与感热

都具有较好的线性关系(如图 6),只是在稳定层 结下,热量通量的值要比不稳定层结时小约一个 量级。分析近地层温度结构参数 CF 与温度、热量 通量及高度的关系,我们得到如下拟合公式

$$C_{T}^{2} = 2.48 \left| \frac{g}{T} \right|^{-\frac{2}{3}} \left| \frac{z}{w'T'} \right|^{-\frac{4}{3}}, \quad z/L < 0 \quad (13)$$
$$C_{T}^{2} = 4.60 \left| \frac{g}{T} \right|^{-\frac{2}{3}} \left| \frac{z}{w'T'} \right|^{-\frac{4}{3}}, \quad z/L > 0 \quad (14)$$

这一拟合公式与文献 [14] 的结果比较一致。

2.5 动量总体输送系数

图7给出了北极朗伊尔宾地区近极昼期间地 面动量总体输送系数 C_D分别随大气稳定度参数 z/L 和平均风速U的变化规律。从图7(a)中可 以看出,在不稳定大气层结条件下,动量总体输

通量 | w'T' | 之间的关系在各种大气层结情况下

送系数C_D的变化范围主要集中在10⁻³量级之间,



图 5 北极朗伊尔宾地区近地层温度结构参数与大气稳定度的关系。(a) 不稳定大气; (b) 稳定大气

Fig. 5 Correlation between temperature structure and atmospheric stability of near surface layer at Longyearbyen. (a) unstable atmosphere; (b) stable atmosphere



图 6 北极朗伊尔宾地区近地层温度结构参数与感热通量 |w'T'| 的关系。(a) 不稳定大气; (b) 稳定大气 Fig. 6 Correlation between temperature structure and sensible heat flux, |w'T'| of near surface layer at Longyearbyen. (a) unstable atmosphere; (b) stable atmosphere

气 候 与 环 境 研 究 Climatic and Environmental Research



北极朗伊尔宾地区极昼期间近地面动量总体输送系数 Co的分布。(a) Co随大气稳定度 z/L 的变化;(b) Co随平均风速 U 的变化 图 7 Distribution of bulk transfer coefficient, C_D of near surface layer momentum during the polar days at Longyearbyen. (a) C_D varies Fig. 7 with air stability parameter z/L; (b) C_D varies with mean wind speed U

随着稳定度由不稳定向稳定层结过渡时, C_D 值有 逐渐减小的趋势。另外,用 3.5 m 高度处的观测 资料计算比用 8 m 处的资料计算的结果略微偏大, 这与胡隐樵等^[15]和李家伦等^[19]所得结论一致,究 其原因主要有二: 一是距地面越近风速受地面粗 糙度影响越大,风速脉动也就越大,从而 u_{*} 就 大; 二是根据近地面对数风速廓线理论, 离地面 越近平均风速 U 就越小, 所以用离地面较近的观 测资料计算的 C_D值会偏大。

北极朗伊尔宾地区极昼期间近地面动量总体输送系 表1 数 C₀ 值

Table 1 The value for bulk transfer coefficient, C_D of near surface layer momentum during polar days at Longyearbyen

	ر د			
资料高度 Data height /m	不稳定层结 Unstable layer $z/L < -0.07^{[20]}$	中性层结 Neutral layer z/L ≤0.07	稳定层结 Stable layer z/L>0.07	
3.5	4. 44×10^{-3}	3. 76×10^{-3}	3. 17×10^{-3}	
8	3.15×10^{-3}	2.68 $\times 10^{-3}$	2. 54×10^{-3}	

人图 7b 可以看出,在风速较小时, C_D 值较大 且比较离散,随着平均风速的增大,C_D值趋于常 数。当平均风速大于 3 m·s⁻¹时, 3.5 m 高度处的 $C_{\rm D}$ 值为 3.57×10⁻³, 8 m 高度处的则为 2.47× 10^{-3} .

表1给出了北极朗伊尔宾地区极昼期间近地 面动量总体输送系数 C_D 在大气层结稳定、中性和 不稳定条件下的值。

总结与讨论 3

本文分析了"中国科学探险协会 2002 年北极 科学探险考察"期间在朗伊尔宾取得的湍流资料, 讨论了近地层湍流能谱、湍流方差、温度结构参 数以及动量整体输送系数等的变化规律,主要得 到如下结论: (1) 北极朗伊尔宾地区大气风速各分量和大

气温度能谱的高频段基本上都能满足 Monin-

No. 2 LIU Yu, et al. An Observation Study of the Surface Layer Atmosphere at Svalbard Area of Arctic. II. 183

Obukhov 相似理论,符合惯性副区的-5/3 次方规律。

(2) 北极朗伊尔宾地区垂直速度无因次方差 σ_w/u_* 值与先前他人在平原地区和起伏地形上的观 测结果很接近,而水平风速无因次方差 σ_u/u_* 与 σ_v/u_* 大于平原地区的值,与起伏地形上的值比较 接近。在不稳定大气层结条件下,无因次风速分 量方差 σ_a/u_* 与z/L关系满足 1/3 次方规律;在 稳定层结下, σ_a/u_* 随着z/L的增大而增大且也符 合 1/3 次方定律。在不稳定层结时观测得到的无 因次温度方差 $\sigma_T/|T_*|$ 随z/L变化满足-1/3次方规律,在稳定层结时 $\sigma_T/|T_*|$ 随z/L的增 大而减小。

(3) 北极夏季陆地下垫面是大气的微弱热源,

ice, climate and its relation with global climate system. Chinese Journal of Polar Research (in Chinese), 1999, 11 (4): $301 \sim 310$

[3] 刘宇,胡非,邹捍,陆龙骅.北极斯瓦尔巴德地区近地层
 大气观测研究 I.平均场特征,气候与环境研究,2005,
 10 (1): 92~100

Liu Yu, Hu Fei, Zou Han, Lu Longhua. An Observation Study on the Surface Layer Atmosphere at Svalbard Area of Arctic. Part I: Characteristics of mean Fields. *Climatic* and Environmental Research (in Chinese), 2005, **10** (1): 92~100

- [4] Kaimal J C , J Wyngaard C, Haugen D A, et al. Turbulence structure in the convective boundary layer. J. Atmos. Sci., 1976, 33, 2152~2169
- [5] 刘辉志,洪钟祥. 青藏高原改则地区近地层湍流特征. 大 气科学,2000,24 (3):289~300
 Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. Turbulent characteristics in

感热通量日均值为 17.5 W⋅m⁻², 朗伊尔宾感热 通量日变化呈单峰分布, 早晚时段感热通量为负 值。

(4) 北极朗伊尔宾地区无因次温度结构参数 $C_T^2 z^{2/3} / T_*^2$ 在不稳定层结下与 z/L之间满足-2/3 次方规律,稳定层结时 $C_T^2 z^{2/3} / T_*^2$ 随 z/L的增大 而减小,但在各种层结条件下,温度结构参数 C_T^2 与热通量 | w'T' | 都具有较好的线性关系。

(5) 北极朗伊尔宾地区动量通量的总体输送 系数 C_D随着大气层结由不稳定向稳定层结的过渡 呈逐渐减小趋势,随平均风速的增大 C_D值趋于常 数。另外,用 3.5 m 处的观测资料计算比用 8 m 处的资料计算的结果略微偏大。

致 谢 中国科学院大气物理研究所高级工程师罗卫 东、冯克宏和王维等为资料的采集付出了辛勤劳动,作者 在此表示诚挚的谢意。

参考文献

the surface layer over Garze area in the Tibetan Plateau. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2000, 24 (3): $289 \sim 300$

- [6] 王介民. 山谷城市的近地层大气湍流谱特征. 大气科学, 1992, 16 (1): 11~17
 Wang Jiemin. The characteristics of turbulent spectrum in the surface layer over valley city. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1992, 16 (1): 11~17
- [7] 曾宗泳,袁仁民,谭锟,等.复杂地形近地面温度谱.量 子电子学报,1998,15 (2):34~139
 Zeng Zongyong, Yuan Renmin, Tan Kun, et al. The spectrum of temperature in the surface layer over complicated terrain. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (in Chinese), 1998, 15 (2):134~139
- [8] Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications. New York: John Wiley and Sons, 1984. 1~397
- [9] 祁永强, 王介民, 贾立, 等. 青藏高原五道梁地区湍流输送特征的研究. 高原气象, 1996, 15 (2): 72~174
 Qi Yongqiang, Wang Jiemin, JiaLi, et al. A study of turbulent transfer characteristics in Wudaoliang area of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, 15 (2): 172~174

[1] 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
[2] 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, SunBo, et al. The Arctic sea [10] 马耀明,马伟强,胡泽勇,等.青藏高原草甸下垫面湍流 强度相似性关系分析.高原气象,2002,21(5):514~ 517

> Ma Yaoming, Ma Weiqiang, Hu Zeyong, et al. Similarity analysis of atmospheric turbulent intensity over grassland surface of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **21** (5): 514~517

[11] Caughey S J, Readings C J. Vertical components of turbulence in convective conditions. Adv. in Geophys., 1974,
 18A: 125~130

境 气 候 与 环 研 究 Climatic and Environmental Research

- Davidson K. L. Observation results on the influence of sta- $\begin{bmatrix} 12 \end{bmatrix}$ bility and wind-wave coupling on momentum transfer and turbulence fluctuations over ocean waves, Bound. -Layer *Meteor.*, 1974, 6: 305~332
- [13] Busch N E. On the mechanics of atmospheric turbulence. In: Workshop on Micro-Meteorology. Haugen D A, Ed. Boston: -Amer. Meteor. Soc. , 1973. $1 \sim 65$
- [14] Wyngaard J C, Cote O R. The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer. J. Atmos. Sci., 1971, 28: 190~201
- [15] 胡隐樵.论近地面层湍流通量观测的一些问题.高原气象, 1990, 9 (1): 74~87

Hu Yinqiao. Discussion on some problems of turbulent flux observation in the surface layer. Plateau Meteorology (in Chinese), 1990, 9 (1): 74~87

[16] Wyngaard J C, Cote O R, Izumi Y. Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress and heat flux.

- [17] Wyngaard J C. On surface layer turbulence. In: Workshop on Micrometeorology. Haugen D A, Ed. Boston: Amer. Meteor. Soc., 1973. 101~149
- [18] 陈陟. 青藏高原大气边界层特征的研究. 中国科学院大气 物理研究所,博士学位论文,2001,19 Chen Zhi. Study on the Characteristics of Atmospheric Boundary Layer over Tibetan Plateau. Thesis for Ph. D, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 2001, 19
- [19] 李家伦,洪钟祥,孙淑芬.青藏高原西部改则地区大气边 界层特征. 大气科学, 2000, 24 (3): 301~312 Li Jialun, Hong Zhongxiang, Sun Shufen. An observational experiment on the atmospheric boundary layer in Gerze area of the Tibetan Plateau. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2000, 24 (3): 301~312
- Golder D. Relations among stability parameters in the sur-[20] face layer. Bound. -Layer Meteor., 1972, 3, 47~58

t

.

.

.

J. Atmos. Sci., 1971, 28: 1171~1182

