

杨郭程,毛东雷,王敏仲,等.塔克拉玛干沙漠腹地夏季稳定边界层高度计算与分析[J].中国沙漠,2023,43(4):64-75.

# 塔克拉玛干沙漠腹地夏季稳定边界层高度计算与分析

杨郭程<sup>1,2</sup>,毛东雷<sup>1</sup>,王敏仲<sup>2</sup>,张建涛<sup>2</sup>,潘红林<sup>2</sup>

(1.新疆师范大学 地理科学与旅游学院/干旱区湖泊环境与资源重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830054; 2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地/新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 利用塔克拉玛干沙漠塔中站2021年7月6—17日加密探空观测数据,分别采用Coen法、Rib法、Liu-Liang法、反转强度法等4种方法进行了稳定边界层高度计算,比较了不同方法计算结果之间的差异,并结合塔中站80 m观测塔梯度探测系统资料,分析了近地面气象因子和稳定边界层高度之间的关系。结果表明:(1)试验期间塔克拉玛干沙漠腹地稳定边界层高度在1 000 m以内,采用4种方法计算的平均高度依次为141、269、227、173 m,平均为202.38 m。稳定边界层在日落后开始发展,并在日出前后发展到最厚,采用4种方法计算的稳定边界层高度平均值从22:15的49、257、164、121 m分别上升至07:15的220、290、242、188 m,边界层高度上升趋势明显。(2)采用4种方法计算的稳定边界层高度总体变化趋势一致,但存在个别极端值,极端值出现多与特殊天气现象有关。其中采用Rib法计算的稳定边界层高度分布范围(10~890 m)大于采用其余3种方法计算的高度范围,可能因为Rib法既考虑了热力因素又考虑了动力因素,综合性较好。采用其余3种方法计算的高度略低,原因可能是每个时刻边界层发展并不均匀,夜间4个时刻平均后拉低了总体平均值,观测期间不同个例地面辐射冷却强度和湍流运动强度也会有影响。(3)不同天气条件下采用4种方法计算的稳定边界层高度也不尽相同。在晴朗夜晚条件下,采用4种方法计算的稳定边界层高度平均偏差最小,高度变化趋势相近;在沙尘天气中,采用4种方法计算的稳定边界层高度平均偏差居中,高度差异主要体现在日出或日落前后;雨天情况下,受边界层内各气象要素变化影响,采用4种方法计算的高度整体差异较大,平均偏差也最大。(4)在晴天天气下,采用Coen法确定的稳定边界层高度呈现出明显的升高过程,能够较为完整地描述稳定边界层在夜间的发展变化过程,几乎没有出现突然升高或降低的异常高度值,适用于热力作用显著的晴天;而在特殊天气条件下建议选择Rib法,该方法既考虑了热力作用又考虑到了动力作用的影响,是一个同时涵盖了风、温、湿的综合性参数,计算的边界层高度不确定性最小,更容易减小误差。(5)沙漠腹地稳定边界层高度受到动力和热力因素的共同影响,与湍流动能、风速、地面温度、土壤热通量的相关性较显著,相关系数最大依次为0.9、0.88、0.63、0.5。

**关键词:** 稳定边界层高度; 计算方法; 影响因子; 塔克拉玛干沙漠

**文章编号:** 1000-694X(2023)04-064-12

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00008

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

## 0 引言

大气边界层(ABL)指大气圈下部直接受到地表影响并与人类生产生活密切相关的低层大气,是人类生产生活联系最紧密的圈层<sup>[1]</sup>。大气边界层高度(ABLh)是其重要的物理参数<sup>[2]</sup>,常被用来描述大气边界层内垂直混合的程度和自由对流交换的水

平,主要分为对流边界层高度(CBLh)和稳定边界层高度(SBLh)<sup>[3]</sup>,稳定边界层高度是反映稳定边界层(SBL)特征和垂直结构的重要参数,是边界层气象学的重要研究内容<sup>[4]</sup>。研究稳定边界层高度不仅会加深对污染物稀释和扩散机理、地气能量交换和相互作用的认知,同时也能增进对沙漠腹地沙尘等天

收稿日期:2022-11-29; 改回日期:2023-01-03

资助项目:新疆维吾尔自治区杰出青年科学基金项目(2022D01E07);“天山英才”培养计划科技创新团队(天山创新团队)项目(2022TSYCTD0007)

作者简介:杨郭程(1995—),男,四川广元人,硕士研究生,研究方向为沙漠边界层气象。E-mail: guocheng10762@163.com

通信作者:毛东雷(E-mail: donglei6325@sina.com)

气现象产生、发展、消退的理解<sup>[5-7]</sup>。由于稳定边界层高度受到起伏地形、土地利用类型、水陆分布等复杂下垫面和季节变化、特殊天气现象、气象条件等因素的影响<sup>[8]</sup>,因此比对流边界层高度更难确定。目前国内外确定稳定边界层高度以传统探测手段和遥感手段为主,缺乏直接探测稳定边界层高度的科学方法<sup>[9-10]</sup>。传统探测手段主要是利用无线电探空气球、系留气球、气象铁塔、气象飞机等工具,结合直接获取的温度、湿度、风速、风向、湍流统计量等气象要素垂直剖面进行诊断分析,例如从湍流运动角度把切向湍流应力消失的高度或垂直方向的相关湍流参数减少到近地面层数值的某个分数的高度定义为稳定边界层高度<sup>[11-12]</sup>,从动力学角度把近地层风速最大值出现的最低高度作为稳定边界层高度<sup>[13-14]</sup>,从热力学角度将位温明显升高或地表逆温延伸到的高度作为稳定边界层高度<sup>[15-16]</sup>,抑或将位温梯度最大或位温梯度首次大于某临界值的高度作为稳定边界层高度<sup>[17-21]</sup>,从物质分布角度把近地面比湿或气溶胶浓度较高的气层高度作为稳定边界层高度<sup>[10]</sup>。这些方法由于能够对低层大气进行加密观测,获取风速、温度、湿度等气象要素资料较为容易等优点被广泛应用。随着科技的进步,遥感探测技术探测边界层高度的方法不断兴起和发展。遥感手段主要是利用风廓线雷达、声雷达、激光雷达、微波辐射计、云高仪、机载雷达、卫星遥感等工具结合边界层内结构参数变化情况来确定稳定边界层高度。相比较而言,遥感手段具有时间/空间分辨率更高、覆盖范围广、受极端天气影响较小等优势近些年研究兴盛,但其相对于传统探测手段而言存在成本高昂、低层观测有盲区等缺点,因此全面普及和换代仍需要一定时间,综合而言常用的确定稳定边界层高度仍以传统探测手段为主。

塔克拉玛干沙漠拥有大量的沙物质,是中国沙尘气溶胶主要发源地<sup>[22]</sup>,独特而广阔的沙漠下垫面和盆地地形,还有干旱少雨的气候,使其对气候变化最为敏感,形成异于其他地区的深厚边界层,因此是学者重点关注的地区,近些年研究主要在大气边界层、沙尘气溶胶、陆面过程等方面<sup>[23-26]</sup>。也有很多学者在塔克拉玛干沙漠开展稳定边界层观测和研究,并取得了一定的研究成果。李祥余等<sup>[27]</sup>利用塔中站80 m观测塔梯度探测系统资料,比较了晴天近地层风、温、湿廓线的昼夜变化特征。刘强等<sup>[28]</sup>采用2008年冬季探空数据,利用不同方法对昼夜大

气稳定度进行了比较。Wang等<sup>[29]</sup>利用GPS探空仪观测实验数据分析了沙漠腹地稳定边界层的垂直结构特征。张建涛等<sup>[30-31]</sup>利用GPS探空和地面气象观测资料,分析了夏季晴朗夜间各气象要素垂直廓线特征和夜间低空急流的变化特征。Wei等<sup>[32]</sup>采用任意阶希尔伯特谱描绘了塔克拉玛干沙漠腹地夜间湍流间歇性变化特征。朱从祯等<sup>[33]</sup>分析了塔克拉玛干沙漠夏季夜间晴日和浮尘日的稳定边界层结构变化及地表辐射收支差异,揭示了浮尘气溶胶对边界层结构影响的作用。这些研究丰富了学者对稳定边界层的认识,揭示了边界层内基本气象要素的变化特征,对研究稳定边界层高度的发展具有重要参考作用。虽然目前对塔克拉玛干沙漠腹地稳定边界层的研究日盛,但是对于稳定边界层高度的确定方法和不同方法之间差异研究尚未见报道。因此评估不同的方法对该地区稳定边界层高度的计算比较具有较大的实用性,对该区域的气候变化和天气预报具有重要的作用。基于此,本文利用塔克拉玛干沙漠腹地加密探空观测数据,采用4种不同方法计算了稳定边界层高度并对比了不同方法间的差异性,结合塔中站80 m观测塔梯度探测系统资料分析了影响稳定边界层高度的因素,从而为了解该区域边界层高度变化特征提供科学依据。

## 1 研究区概况

塔克拉玛干沙漠位于新疆南部的塔里木盆地内,面积约33.76万km<sup>2</sup>,是中国最大的沙漠和世界第二大流动性沙漠<sup>[34-35]</sup>。塔克拉玛干沙漠北、西、南3个方向较为封闭,只在东部的罗布泊沼泽有一个缺口。塔克拉玛干沙漠深居内陆、距海遥远,海洋的暖湿气流很难到达,平均年降水量15~60 mm,最低只有4 mm左右;而平均年蒸发量却高达3 000 mm。塔中站(39°03'N、83°62'E,海拔1 099.3 m)位于塔克拉玛干沙漠腹地<sup>[30]</sup>(图1),年平均温度13.6℃,年平均降水量25.9 mm,以流动沙地为主,受到人类活动影响较小,边界层发展较为完整和真实,是开展沙漠腹地夏季稳定边界层研究的理想场所。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

利用塔中站2021年7月6—17日加密探空观测试验数据和2021年7月6—16日80 m观测塔梯度



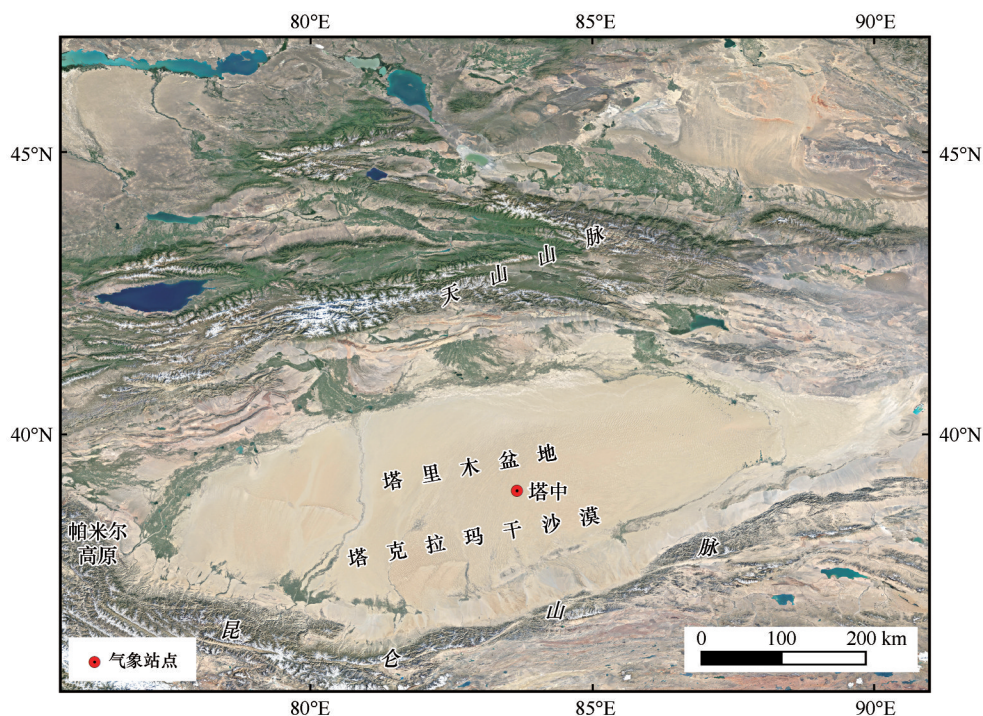


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of research area

探测系统资料进行分析。加密探空观测每天进行8次,时间间隔为3 h,其中除7月6—11日 10:15、16:15,7月6日 04:15,7月10日 01:15,7月17日 04:15和22:15缺测外,期间合计有效放飞探空气球81次。结合塔中站的实际情况,将22:15、01:15、04:15、07:15等4个夜间时段用以分析稳定边界层高度的发展变化特征。试验中最大探空高度为7 379~30 254.8 m,能够完整地反映稳定边界层的变化特征。为了最大限度地保证研究的真实性和准确性,首先对原始数据中存在明显错误和不符合一般统计特征的信息进行了处理。根据相关研究<sup>[36-38]</sup>,对瞬时风速  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上、温度超过  $60^\circ\text{C}$  以及风向大于  $360^\circ$ 、湿度超过 100% 等没有物理意义的野点数据进行了剔除,并进行了高度订正,对缺失的数据进行了线性插值处理(式1)。

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (1)$$

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 转换公式

根据资料分析的需要,对于测得的气压  $P$  (hPa)、温度  $t$  ( $^\circ\text{C}$ )、相对湿度  $f$  (%)、风速  $V$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 等数据,可以通过泊松公式来转化为高度  $h$  (m)、比湿  $q$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、位温  $\theta$  (K)。

$$\theta = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^{0.286} \quad (2)$$

$$q = 0.622 \times \frac{e}{P - 0.378e} \quad (3)$$

式中: $P$ 是空气压强; $P_0$ 是参考压强,常取 1 000 hPa;绝对温度  $T=t+273.15$ ;水汽压  $e = e_s \times f$ ,  $e_s$  为某温度下的饱和水汽压。

### 2.2.2 稳定边界层高度计算方法

首先对样本数据从地面开始进行 5 hPa 间隔的重新采样后,计算了第五层和第二层之间的位温差 (PTD),然后结合近地面 100 m 内的探空数据计算的总体理查逊数 ( $Rib$ ) 对大气边界层热力性质进行判别<sup>[39]</sup>,如果  $PTD > 0.1 \text{ K}$  且  $Rib > 0$ ,判定为稳定边界层;如果  $-0.1 \text{ K} < PTD < 0.1 \text{ K}$ ,判定为中性边界层 (NBL);其他的所有情形一律判定为对流边界层。

Coen法。Coen法本质上是一种基于温度梯度进行判别的热力性质法,把夜间从地面开始,温度梯度首次为 0 的点对应的高度确定为稳定边界层高度<sup>[40-41]</sup>。

总体理查逊数法 ( $Rib$  法)。本文把 0.25 作为临界理查逊数 ( $Ric$ ),将计算出的每一高度的  $Rib$  依次和  $Ric$  相比,取  $Rib$  首次超过  $Ric$  的高度作为稳定边界层高度<sup>[41]</sup>。

$$R_{ib} = \frac{g(z - z_0)}{\theta_{v(z)}} \frac{\theta_{v(z)} - \theta_{v(z_0)}}{u(z)^2 + v(z)^2} \quad (4)$$

$$\theta_v = \theta \times (1 + 0.61q) \quad (5)$$

式中:  $g$  为重力加速度, 取值为  $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $\theta_v$  为虚位温;  $z_0$  为地面海拔高度;  $z$  为海拔高度;  $u(z)$ 、 $v(z)$  分别为高度  $z$  处的东风、北风分量。

Liu-Liang 法<sup>[39]</sup>。通过分别计算热力强迫引起的边界层高度和急流中心高度, 选取最小值为稳定边界层高度。当湍流是浮力强迫引起时, 首先从地表开始找到位温梯度达到一个极小值的高度  $k$ , 则取满足式(6)的  $k$  的高度为稳定边界层高度<sup>[42]</sup>; 当湍流是风切变引起时, 先从地面( $z_0$ )开始找到风速极大值点, 且从  $z_0$  至  $z$  必须为单调递增, 则满足式(7)的  $z$  的高度为稳定边界层高度<sup>[43]</sup>。

$$\dot{\theta}_k - \dot{\theta}_{k-1} < -\delta \text{ 或 } \dot{\theta}_{k+1} < \gamma, \dot{\theta}_{k+2} < \gamma \quad (6)$$

$$V(z) \geq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ 且 } z < 1500 \text{ m} \quad (7)$$

式中:  $\dot{\theta}_k \equiv \frac{\partial \theta_k}{\partial z} \geq \gamma$ , 根据 Liu 等<sup>[39]</sup>的研究结果,  $\delta=0.5 \text{ K}$ ,  $\gamma=0.004 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

反转强度法。把夜间地面反转(NSI)或逆温层出现明显转向的高度确定为稳定边界层高度。Hyun 等<sup>[44]</sup>根据 CASES-99 实验得出中纬度内陆地区稳定边界层高度处的温度约为反转强度处 80% 的水平。这表明该方法可以对稳定边界层高度进行估算<sup>[45]</sup>:

$$\delta = |\bar{\theta}_r - \theta_0| \quad (8)$$

$$\theta_h = \theta_0 + A \cdot \delta \quad (9)$$

式中:  $\bar{\theta}_r$  表示残留层平均位温;  $\theta_0$  表示地表 5 m 高度的空气位温;  $\delta$  表示逆温强度;  $A$  是经验常数(取值 0.8);  $\theta_h$  表示稳定边界层处的位温。

### 3 结果与分析

#### 3.1 稳定边界层高度变化特征

在 2021 年 7 月 6—17 日观测期间, 22:15 太阳辐射开始减弱, 大气湍流活动也随之减弱, 气温缓慢降低, 混合层高度开始下降, 白天对流边界层开始向夜间稳定边界层转变, 此时由于稳定边界层处于发展初期, 发展还不够充分, 因此稳定边界层高度也较低(图 2A), 采用 4 种方法计算的稳定边界层高度分别为 49、257、164、121 m。其中采用 Rib 法在 7 月 13 日和 16 日确定的稳定边界层高度较高, 分别为 710、790 m, 其余 3 种方法确定的高度较为接近,

且都在 500 m 以下, 其原因可能是受到低空急流和 13 日夜间一次降水过程对 Rib 法产生较大影响, 导致估算结果差异较大。01:15 地面开始进一步冷却, 稳定边界层高度有缓慢上升的迹象(图 2B), 采用 4 种方法计算的稳定边界层高度分别为 98、251、225、141 m。和前一时刻相比, 采用 Coen 法确定的高度上升最为明显, 增幅 100%, 这可能是因为塔中站昼夜温差较大, 热力作用对稳定边界层高度反应更为敏感所致。04:15 随着地面的进一步冷却, 逆温层厚度不断增大, 此时夜间大气趋于稳定状态, 大气稳定度较好, 稳定边界层高度也随之进一步发展, 采用 4 种方法计算的稳定边界层高度分别为 166、251、252、229 m, 差异逐渐减小(图 2C), 稳定边界层高度随着时间的推移其高度在不断增加并在 07:15(日出前后)达到最大(图 2D), 采用 4 种方法计算的稳定边界层高度平均值分别为 220、290、242、188 m。从图 2E 可以看出, 塔克拉玛干沙漠腹地夏季稳定边界层高度均在 1 000 m 以内, 稳定边界层高度日变化呈现出一个波动的状态, 但波动幅度不大, 体现了稳定边界层的稳定性。结合表 1 得出采用 4 种方法计算的平均高度约为 200 m, 这与张建涛等<sup>[31]</sup>的研究结果接近。表 1 中平均偏差( $AD$ )最大值为 13 日(152.94), 最小值为 15 日(20.31); 相对平均偏差( $RAD$ )最大值为 6 日(49.86%), 最小值为 14 日(16.51%); 标准偏差( $SD$ )最大值为 13 日(84.2), 最小值为 15 日(9.76); 相对标准偏差( $RSD$ )最大值为 11 日(2.82), 最小值为 12 日(0.01); 4 个参数量共同说明了采用 4 种方法计算的日平均稳定边界层高度差异性, 数值越大表明差异越大, 故差异较大的是 13 日, 差异较小的是 15 日, 计算结果和图 2E 趋势一致。造成 13 日计算结果差异较大的原因可能是受到天气的影响, 由于 4 种计算方法的侧重点不同和  $Ric$  值选取的原因, 导致当日采用 Rib 法计算的结果偏高; 而 15 日差异较小的原因可能是晴天低风的稳定天气导致边界层发展较为稳定。

#### 3.2 不同方法确定稳定边界层高度的差异

不同方法由于采用的参考量不同, 导致计算的稳定边界层高度存在一定的差异(图 3)。就高度分布范围来看, 采用 Rib 法计算的稳定边界层高度分布范围较广(10~890 m), 大于采用其余 3 种方法计算的高度范围。从所有样本来看, 塔中站稳定边界层高度多分布在 77 m(下四分位数)至 251 m(上四



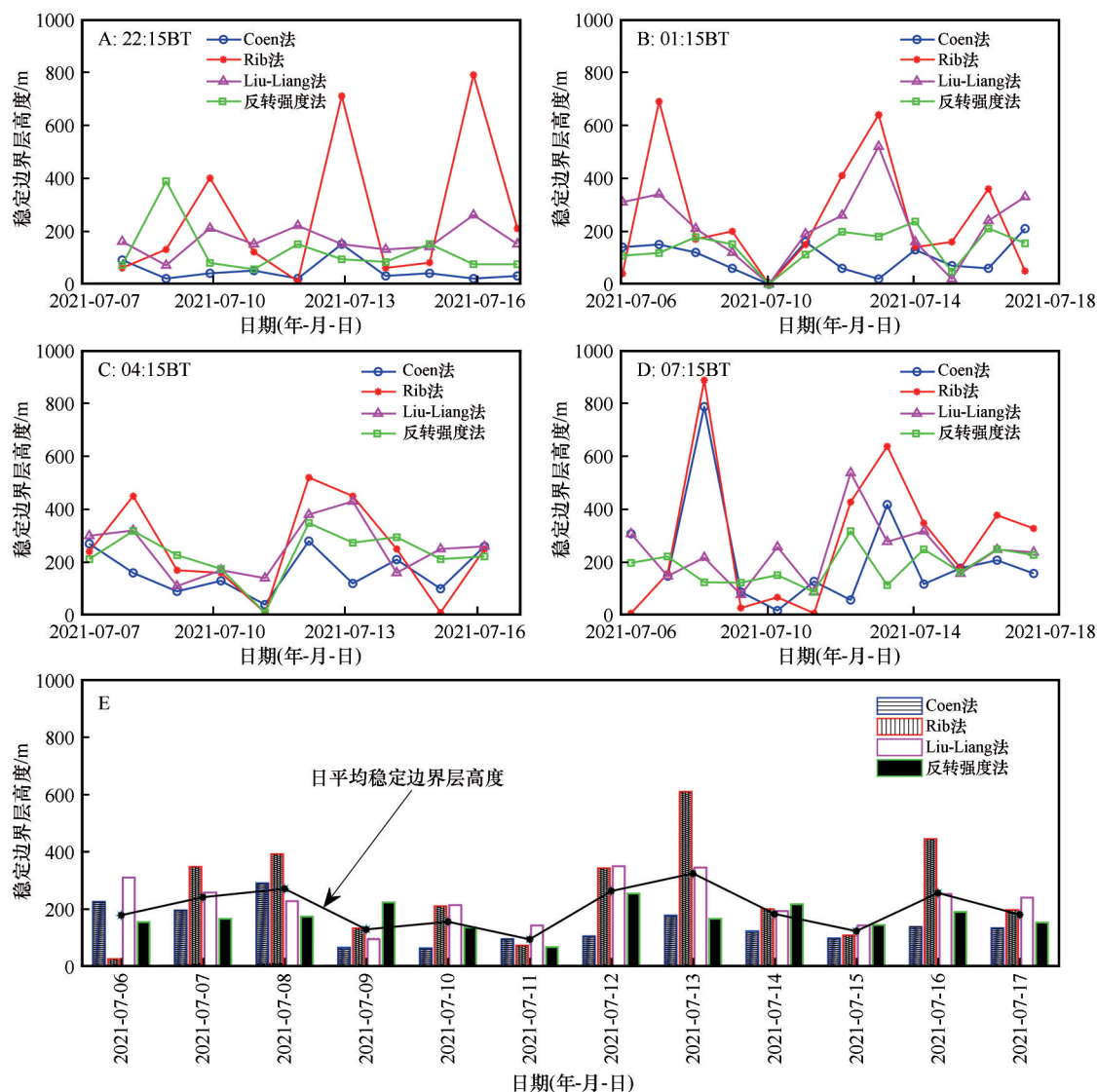


图2 塔克拉玛干沙漠腹地夏季稳定边界层高度变化

Fig.2 Variation of stable boundary layer height in the hinterland of Taklimakan Desert in summer

分位数),只有采用反转强度法的计算结果完全包含在这个范围内且没有数据异常值分布,这可能是由于其特别的计算方法的原因所致,由于残留层平均位温值的选取较为固定,导致计算出来的稳定边界层高度不可能超过 $\bar{\theta}_i$ 值,因此数据分布集中。结合表2可以看出,采用4种方法计算的稳定边界层高度最大值的差异较大,最小值的差异较小,平均值依次为141、269、227、173 m,稳定边界层发展并不深厚的原因可能是每个时刻边界层发展并不均匀,4个时刻多次平均后拉低了总体平均值,又因本月天气以扬沙、浮尘、沙尘暴为主,加剧了地面辐射冷却强度,影响了稳定边界层的发展。

采用反转强度法计算的稳定边界层高度大部分数据的频率都较低,其中74、151、212 m等3个高

度出现的频率较高,为4.55%(图4D)。采用其余3种方法计算的稳定边界层高度主要集中在20~210 m(图4A)、10~250 m(图4B)、150~260 m(图4C)范围内,出现频率最多的高度分别是20 m、10 m、150~160 m,占比为11.36%、11.36%、18.18%。从采用4种方法计算的所有稳定边界层高度的频率分布可以看出(图4E),频率较高的数据分布在10~260 m内,占比为77.27%,其中160 m出现的频率最高,为5.69%,176个样本的平均高度为202.38 m。采用Coen法和Rib法计算出的频率最高的高度值最为吻合,具有较高的可信度,较小值出现在22:15前后,这是因为此时太阳辐射减弱,热通量开始下降,湍流开始减弱,地面辐射冷却使地温开始降低,逆温层开始形成和发展,白天对流边界层开始向夜间稳

表 1 稳定边界层高度相关参数变化

Table 1 Variation of parameters related to the height of stable boundary layer

日期	Coen 法	Rib 法	Liu-Liang 法	反转强度法	平均值	平均偏差 (AD)	相对平均偏差 (RAD)	标准偏差 (SD)	相对标准偏差 (RSD)
2021-07-06	225.00	25.00	310.00	154.00	178.50	89.00	49.86	45.19	0.04
2021-07-07	195.00	347.50	257.50	165.75	241.44	61.06	25.29	35.49	0.04
2021-07-08	290.00	392.50	227.50	173.50	270.88	70.38	25.98	39.98	0.09
2021-07-09	65.00	132.50	95.00	222.75	128.81	48.80	37.89	38.67	0.02
2021-07-10	63.34	210.00	213.34	136.00	155.67	56.00	35.97	28.07	0.02
2021-07-11	95.00	72.50	142.50	66.75	94.19	24.56	26.08	10.70	2.82
2021-07-12	105.00	342.50	350.00	254.00	262.88	83.38	31.72	46.65	0.01
2021-07-13	177.50	610.00	345.00	165.75	324.56	152.94	47.12	84.20	0.01
2021-07-14	122.50	200.00	192.50	216.50	182.88	30.18	16.51	15.99	0.03
2021-07-15	97.50	107.50	142.50	143.75	122.81	20.31	16.54	9.76	0.08
2021-07-16	137.50	445.00	252.50	189.75	256.19	94.41	36.85	46.57	0.02
2021-07-17	133.34	196.67	240.00	153.00	180.75	37.58	20.79	24.25	0.03

边界层高度为同类方法在夜间 4 个时刻的算术平均值,除 RAD 单位为%以外,其余所有参数单位为 m。

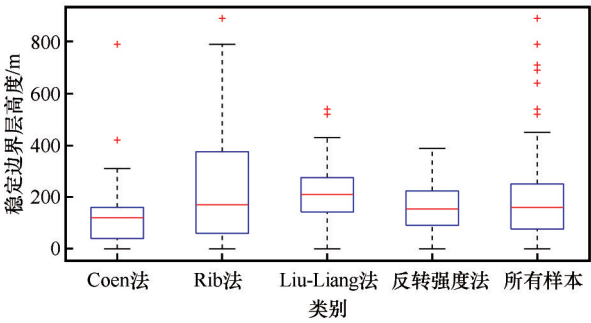


图 3 不同方法计算的塔中站夏季稳定边界层高度箱型图

Fig.3 Summer stable boundary layer height box pattern of Tazhong Station calculated by different methods

定边界层转化,但稳定边界层此时处于发展初期,故高度较小值较多。采用 Liu-Liang 法计算的稳定边界层高度较高频率高度值大于前两种方法计算的结果。采用反转强度法计算的稳定边界层高度没有集中且连续的高频率范围,频率分布较为均匀。

不同天气条件下采用 4 种方法确定的稳定边界

层高度也存在一定的差异。采用 Coen 法与 Rib 法计算的稳定边界层高度在晴天和沙尘天气较为一致(图 5A1、C1),AD 分别为 38.75、48.75 m,远小于雨天(151.25 m,图 5B1),其中 01:15—07:15 间有较大差异,这可能是因为夜间的降水过程抑制了稳定边界层的发展,导致采用 Coen 法计算结果偏低;而采用 Rib 法由于降水带来的增湿效果对冲了位温降低带来的影响,因此高度并没有明显降低,仍在波动中上升,并在日出前后达到最大。采用 Coen 法与 Liu-Liang 法计算的稳定边界层高度在晴天(图 5A2)和沙尘天(图 5C2)变化趋势相近,仅在晴天日出前后存在些许差异,最大差异仍然在雨天(图 5B2)。在稳定边界层发展过程中,采用 Liu-Liang 法计算的稳定边界层高度在 01:15 被明显高估,其中该时刻两种方法计算的高度差达到 500 m,在 04:15 及以前,采用 Coen 法计算的稳定边界层高度高于采用 Liu-Liang 法计算的高度,在这之后开始反

表 2 不同方法计算的稳定边界层高度特征比较

Table 2 Comparison of stable boundary layer height characteristics calculated by different methods

方法	最大值	最小值	中值	标准差	平均值	变异系数/%
Coen 法	790	20	120	133	141	94.36
Rib 法	890	10	190	230	269	85.51
Liu-Liang 法	540	20	220	109	227	47.96
反转强度法	388	10	160	85	173	49.27



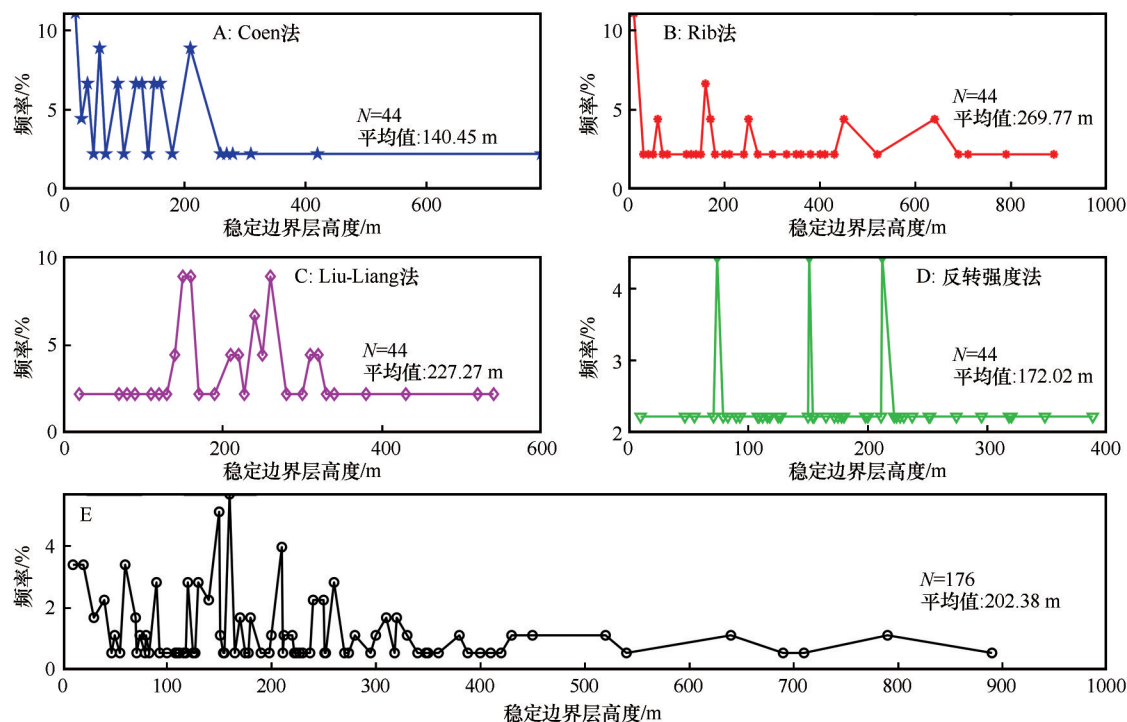


图4 不同方法计算的塔中站夏季稳定边界层高度频率分布

Fig.4 Frequency distribution of stable boundary layer height in Tazhong Station in summer calculated by different methods

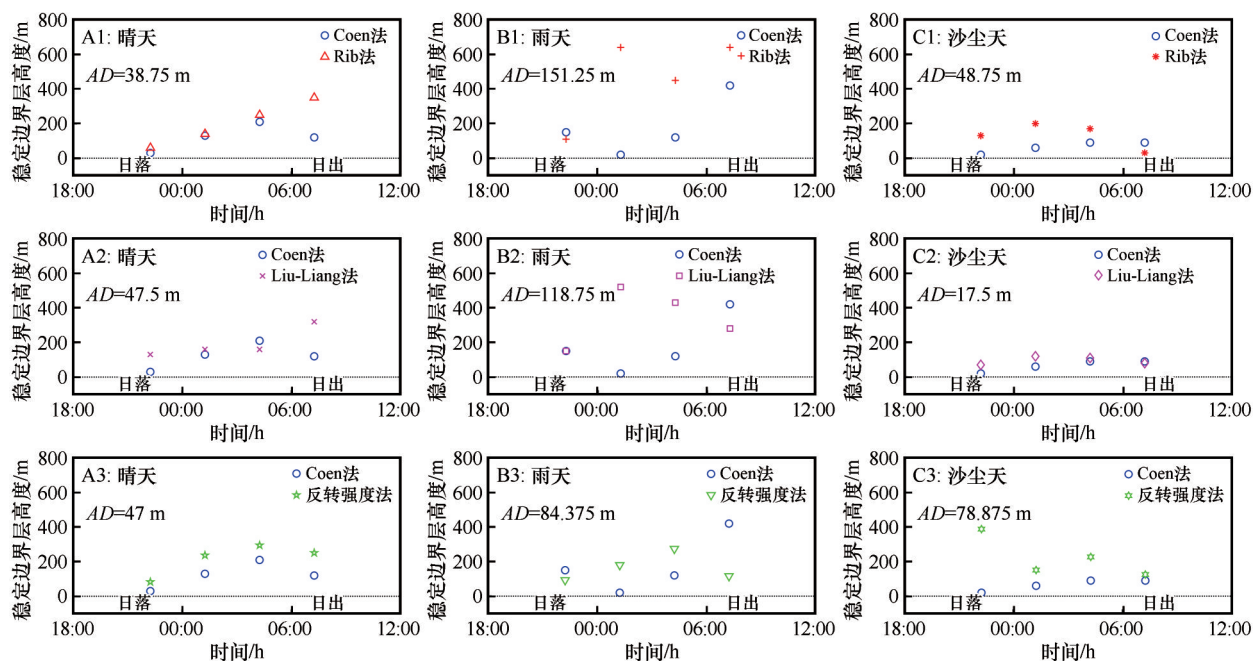


图5 采用4种方法在不同天气条件下计算的稳定边界层高度个例对比

Fig.5 Example comparison of stable boundary layer height of four methods under different weather conditions

超,但差距不大。这可能是因为临近日出,地面开始缓慢增温所致。而采用反转强度法计算的稳定边界层高度略高于 Coen 法,尤其是在晴天(图 5A3),二者变化非常一致,并且随着时间的推移,计算的稳定边界层高度有明显的上升趋势,在日出前后达到最大值。而沙尘天(图 5C3)除了在 22:15 采

用反转强度法明显高估了稳定边界层高度以外,其余时间的变化趋势相近,雨天的波动仍然较大(图 5B3)。结合 22:15 的位温可以看出,此时近地面位温仍处于高位,在 1 000 m 高度内还未形成明显的逆温层,稳定边界层内位温分布曲率仍处于低位( $\gamma=-0.121$ ),因此在确定稳定边界层高度过程中采

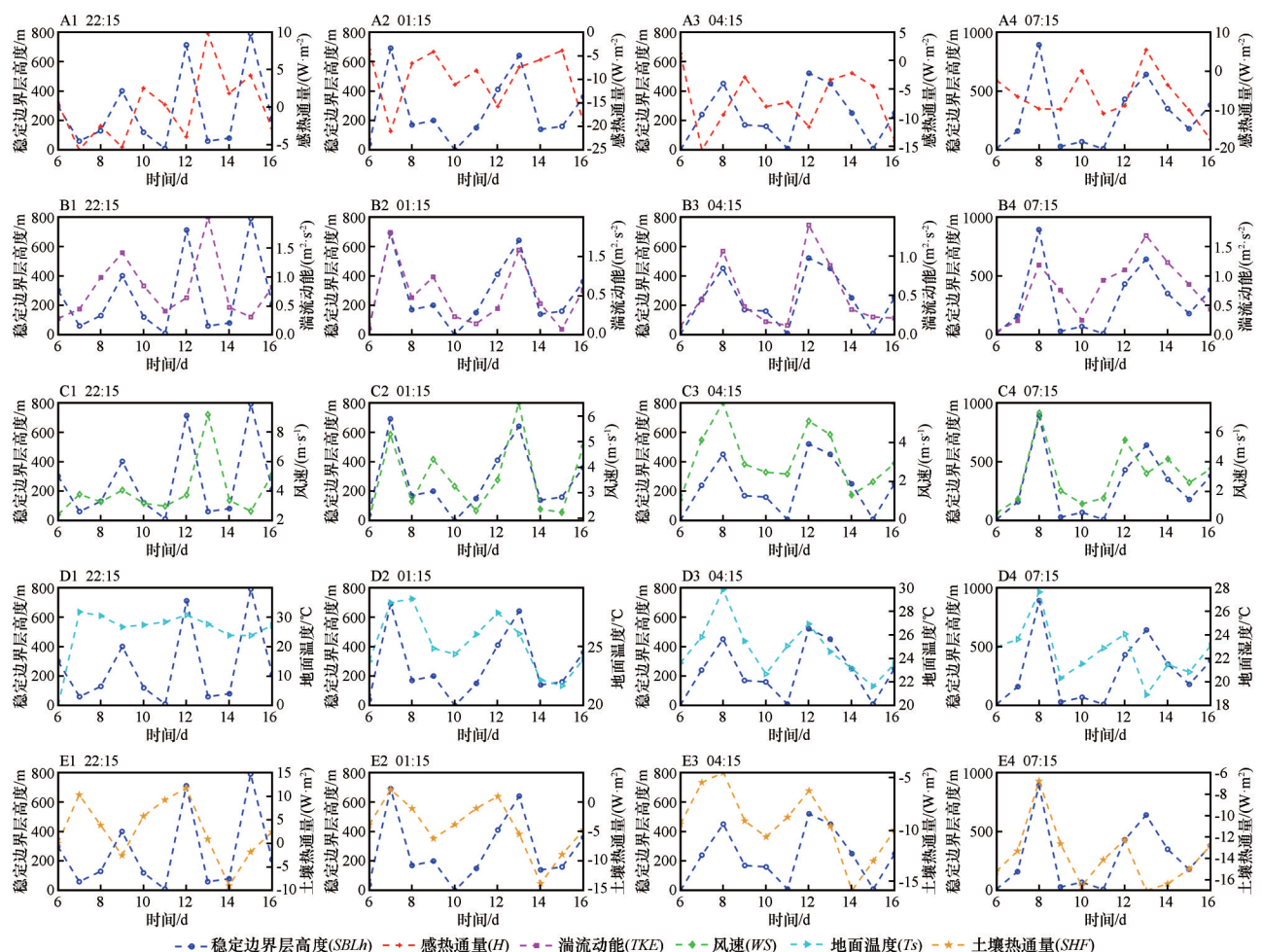
用反转强度法确定的高度偏高。

### 3.3 稳定边界层高度和近地面气象因子的相关分析

2021年7月6—16日,稳定边界层高度受感热通量( $H$ )、湍流动能( $TKE$ )、风速( $WS$ )、地面温度( $T_s$ )、土壤热通量( $SHF$ )影响较大。塔中站夏季高温少雨,热力作用显著。白天,受到太阳辐射的影响,净辐射增大,地面温度高于大气温度,对应于较大的 $H$ ,并通过湍流热交换不断地加热周边的大气,造成垂直方向上的湍流运动,实现了地气之间的能量交换,在白天形成较为深厚的对流边界层;夜晚地表辐射冷却后, $H$ 由22:15的0下降到07:15的 $-7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右(图6A1~A4),随着地面辐射冷却的加剧, $T_s$ 逐渐下降,导致大气自上而下地降温形成的逆温层厚度却在不断增加,对应于较为深厚的稳定边界层。在稳定边界层发展过程中呈现出与白天

大气边界层相反的过程,其高度随着 $H$ 的增大而减小,但是效果并不显著。夜间地表蒸发微弱,饱和水汽压较低,相对湿度较大,较大的相对湿度促进了地气之间的水汽交换,较大的水汽通量改变了 $TKE$ 中浮力项的大小,从而使得 $TKE$ 增大,边界层发展变高(图6B1~B4)。从图6C1~C4可以看出,近地面2 m高度风速会加剧空间范围内物质、能量运动,因此与稳定边界层高度变化呈现出较高的正相关性。从图6D1~D4、E1~E4可以看出, $T_s$ 和 $SHF$ 的变化趋势相近,较高的 $T_s$ 和 $SHF$ 往往对应于较高的稳定边界层。这是因为热量不仅会向上(大气)传导,还会向下(土壤)传导,夜间 $T_s$ 主要受大气向下传导,此时大气的温度越高,则 $T_s$ 也会随之升高,形成的大气层结越稳定,逆温层发展越深厚,稳定边界层高度越高。

从时刻来看,由于22:15各气象因子为22:00—23:00的平均值,误差相对较大,因此相关性并不十



22:15和01:15为邻近2 h气象因子平均量,04:15和07:15为邻近3 h气象因子平均量

图6 稳定边界层高度与近地面气象因子之间的变化曲线

Fig.6 The variation curve between the height of stable boundary layer and near-surface meteorological factors



分显著,后3个时刻均为日落后的平均值,地面辐射冷却显著,因此相关性相对较好,其中相关性最强的是  $TKE$ 、 $WS$ 、 $T_s$ ,分别为0.9、0.88、0.63(表3)。热力因子能够为边界层的发展提供充足能量,动力因

子能够加速边界层上部气流运动,二者共同促进了稳定边界层高度的发展。影响沙漠腹地夜间稳定边界层高度的主要因素有  $TKE$ 、 $WS$ 、 $T_s$ 、 $SHF$  等因素。

表3 稳定边界层高度与近地面气象因子之间的相关性

Table 3 Correlation between stable boundary layer height and near-surface meteorological factors

相关系数	感热通量( $H$ )	湍流动能( $TKE$ )	风速( $WS$ )	地温温度( $T_s$ )	土壤热通量( $SHF$ )
稳定边界层高度_Rib(22:15)	-0.12*	-0.22*	-0.27*	-0.21*	-0.02
稳定边界层高度_Rib(01:15)	-0.60*	0.85*	0.84*	0.52*	0.38*
稳定边界层高度_Rib(04:15)	-0.22*	0.90*	0.79*	0.63*	0.47*
稳定边界层高度_Rib(07:15)	0.05*	0.66*	0.88*	0.40*	0.50*

\*表示通过0.05显著性检验。

## 4 讨论

4种方法在确定夏季稳定边界层高度上总体趋势一致,但是不同方法在不同天气条件下仍存在一些高度异常值,本文选择7月12—13日夜间来具体讨论造成这种差异的可能原因。从图7A可以看出,对流边界层高度仍然处于维持期,保留着较高高度,之后处于一个快速下降时期,白天对流边界层迅速崩塌并在日落前后开始形成(图7B),在夜间进一步发展(图7C、D),日出前后(图7E)达到最大值,之后由于地面气温升高产生正辐射通量,近地面空气开始受热变暖,源源不断的加热导致暖空气

随之抬升,稳定边界层开始消失,对流运动开始发展重新生成对流边界层(图7F)。可以看出不同方法间差异较大的时刻一般出现在日落和日出前后,这与诸多研究结果相似。王雨婷<sup>[46]</sup>利用Rib法和Liu-Liang法对比了北京站稳定边界层高度的差异,发现部分高度相差明显。Hyun等<sup>[44]</sup>利用反转强度法等4种方法对比分析了温带草原稳定边界层高度的差异性,发现很难找到在任何一晚确定稳定边界层高度时都具有高度的良好相关性的方法。杨飞跃<sup>[9]</sup>采用位温梯度法等4种方法对比了榆中站边界层发展特征,发现稳定边界层高度变化幅度不大,但不同方法确定的高度高值之间存在较大差异。

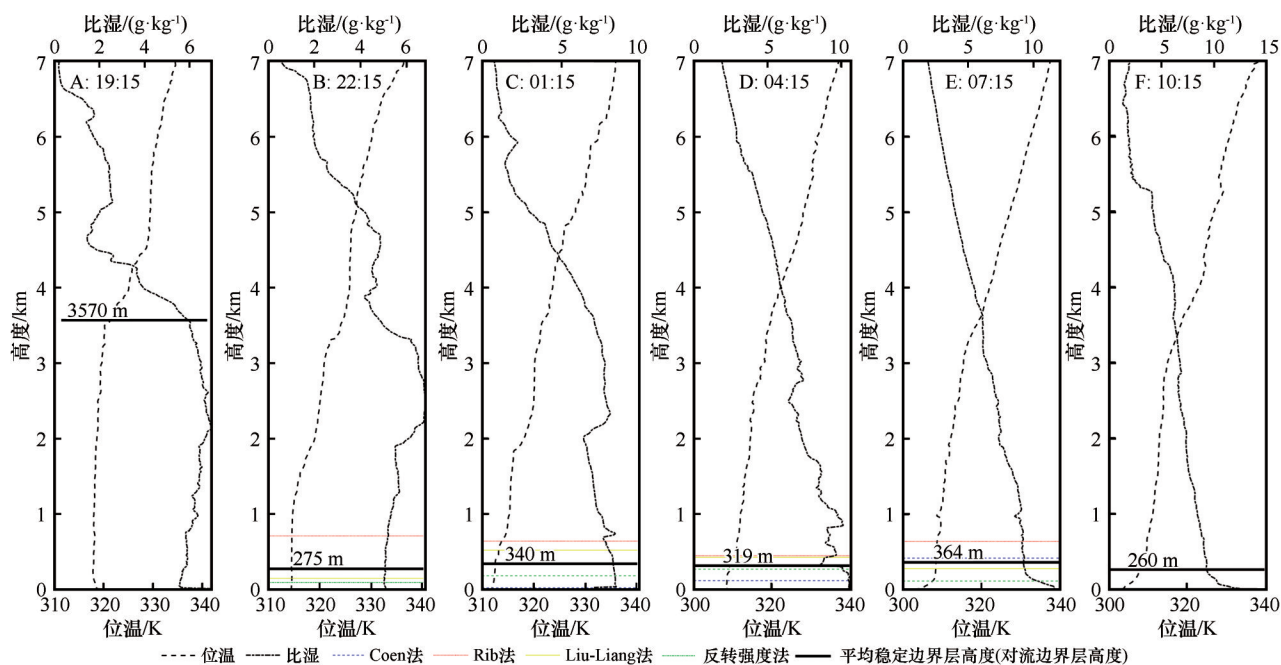


图7 不同方法确定稳定边界层高度个例差异分析

Fig.7 Case difference analysis of stable boundary layer height determined by different methods

之所以造成这些差异既有方法本身约束的主观原因,也有现实条件限制的客观原因。4种方法都有其特定的边界层高度计算公式和原理,其所选择的物理参数不同导致计算出来的结果有一定的误差,进而表现为稳定边界层高度的差异性。但是在统计学上,4种方法之间虽然相关性并不显著(0~0.45)但仍有一定的相关性,相关性最优的是Rib法和Liu-Liang法,相关系数为0.45,这是因为两种方法都考虑了热力作用和动力作用,计算原理相似。采用Coen法计算的沙漠腹地稳定边界层高度没有表现出明显的突然上升和下降,在地面积温较高、逆温层发育完整的夜间具有一定的应用价值。采用反转强度法计算的高度异常值最小,其高度取决于 $\bar{\theta}_r$ 的选择,其本质也是一种热力学方法,在位温廓线发育充分时期,该方法不失为一种可靠的检验方法。虽然采用4种方法都能完整地反演塔克拉玛干沙漠腹地夏季稳定边界层高度,但受制于天气现象、计算原理、人工误差等也会存在一些差异。总体而言,塔克拉玛干沙漠腹地处于极端干旱区,地表加热作用强,近地面大气受到热力作用影响显著,因此位温廓线发育完整,在晴朗天气条件下可以首选Coen法来计算稳定边界层高度。而在特殊天气条件下建议选择Rib法,该方法既考虑了热力作用又考虑到了动力作用的影响,是一个同时涵盖了风、温、湿的综合性参数,且其计算的边界层高度不确定性最小,因此在特殊天气条件下更容易减小误差,确保稳定边界层高度计算的准确性。本文受制于数据量样本的限制,不能更加深入地分析稳定边界层高度与近地面气象因子的关系,部分特殊天气的观测资料亦缺失,未来期望可以借助激光雷达及更先进的设备或方法进行全天候的加密观测,加深对大气边界层过程的理解,从而为灾害性天气的预报提供依据。

## 5 结论

试验期间塔克拉玛干沙漠腹地稳定边界层高度在1 000 m以内,采用4种方法计算的平均高度依次为141、269、227、173 m,平均为202.38 m。稳定边界层在日落后开始发展,并在日出前后发展到最厚,采用4种方法计算的稳定边界层高度平均值从22:15的49、257、164、121 m分别上升至07:15的220、290、242、188 m,边界层高度上升趋势明显。

采用4种方法计算的稳定边界层高度总体变化

趋势一致,但存在个别极端值,极端值出现多与特殊天气现象有关。其中采用Rib法计算的稳定边界层高度分布范围(10~890 m)大于采用其余3种方法计算的高度范围,可能是其既考虑了热力因素又考虑了动力因素,综合性较好所致。采用其余3种方法计算的高度略低,原因可能是每个时刻边界层发展并不均匀,夜间4个时刻平均后拉低了总体平均值,观测期间地面辐射冷却强度和湍流运动强度也有影响。

不同天气条件下采用4种方法计算的稳定边界层高度也不尽相同。在晴朗夜晚条件下,采用4种方法计算的稳定边界层高度平均偏差最小,高度变化趋势相近;在沙尘天气中,采用4种方法计算的稳定边界层高度平均偏差居中,高度差异主要体现在日出或日落前后;雨天情况下,受边界层内各气象要素变化影响,采用4种方法计算的高度整体差异较大,平均偏差也最大。

在晴天天气下,采用Coen法确定的稳定边界层高度呈现出明显的升高过程,能够较为完整地描述稳定边界层在夜间的发展变化过程,几乎没有出现突然升高或降低的异常高度值,适用于热力作用显著的晴天;而在特殊天气条件下建议选择Rib法,该方法既考虑了热力作用又考虑到了动力作用的影响,是一个同时涵盖了风、温、湿的综合性参数,计算的边界层高度不确定性最小,更容易减小误差。

沙漠腹地稳定边界层高度受到动力和热力因素的共同影响,与湍流动能、风速、地面温度、土壤热通量的相关性较显著,相关系数最大依次为0.9、0.88、0.63、0.5。

## 参考文献:

- [1] Stull R B. 边界层气象学导论[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991: 1-17.
- [2] 宋星灼, 张宏升, 刘新建, 等. 青藏高原中部地区不稳定大气边界层高度的确定与分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(3): 328-333.
- [3] 徐桂荣, 崔春光, 周志敏, 等. 利用探空资料估算青藏高原及下游地区大气边界层高度[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(3): 217-227.
- [4] Steeneveld G J, Van de Wiel B J H, Holtslag A A M. Diagnostic equations for the stable boundary layer height: evaluation and dimensional analysis[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(2): 212-225.
- [5] Xiang Y, Zhang T S, Liu J G, et al. Atmosphere boundary layer height and its effect on air pollutants in Beijing during winter heavy pollution[J]. Atmospheric Research, 2019, 215: 305-316.
- [6] 师宇, 胡非, 丁伟宸, 等. 气溶胶激光雷达和无线电探空观测边界层高度的对比分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(5):



- 650–662.
- [7] Yi C, Davis K J, Bakwin P S, et al. Observed covariance between ecosystem carbon exchange and atmospheric boundary layer dynamics at a site in northern Wisconsin [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D8): 302–310.
- [8] Mahrt L, Heald R C. Comments on "Determining Height of the Nocturnal Boundary Layer" [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(3): 383.
- [9] 杨飞跃. 半干旱区边界层高度的确定方法比较及特征研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [10] 张宏昇, 张小曳, 李倩惠, 等. 大气边界层高度确定及应用研究进展 [J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 522–536.
- [11] Kosović B, Curry J A. A large eddy simulation study of a quasi-steady, stably stratified atmospheric boundary layer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(8): 1052–1068.
- [12] Brost R A, Wyngaard J C. A model study of the stably stratified planetary boundary layer [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1978, 35(8): 1427–1440.
- [13] Melgarejo J W, Deardorff J W. Stability functions for the boundary-layer resistance laws based upon observed boundary-layer heights [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31(5): 1324–1333.
- [14] 伏薇, 李茂善, 阴蜀城, 等. 西南南支与高原季风环流场下青藏高原大气边界层结构研究 [J]. *高原气象*, 2022, 41(1): 190–203.
- [15] 乔娟. 西北干旱区大气边界层时空变化特征及形成机理研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
- [16] 吕雅琼, 马耀明, 李茂善, 等. 青藏高原纳木错湖区大气边界层结构分析 [J]. *高原气象*, 2008, 27(6): 1205–1210.
- [17] 董议文, 张蕴斐, 张戈, 等. 不同边界层高度诊断方法对海洋大气边界层高度诊断的适用性研究 [J]. *海洋预报*, 2021, 38(6): 64–72.
- [18] 周怡雯. 台风云系、边界层和气溶胶物理光学特征变化综合遥感分析 [D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [19] Shi Y, Hu F, Xiao Z X, et al. Comparison of four different types of planetary boundary layer heights during a haze episode in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134928–134928.
- [20] 蔡嘉仪, 苗世光, 李炬, 等. 基于激光云高仪反演全天边界层高度的两步曲线拟合法 [J]. *气象学报*, 2020, 78(5): 864–876.
- [21] 岳平, 牛生杰, 张强, 等. 春季晴天蒙古高原半干旱荒漠草原地区边界层结构的一次观测研究 [J]. *高原气象*, 2008, 27(4): 757–763.
- [22] 彭艳梅, 王舒, 肖高翔, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区大气气溶胶散射系数影响因子 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 384–392.
- [23] 王敏仲, 徐洪雄, 王寅钧, 等. 塔克拉玛干沙漠夏季晴空对流边界层大涡模拟 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1275–1286.
- [24] 贾瑞, 刘玉芝, 吴楚樵, 等. 2007—2017年中国沙尘气溶胶的三维分布特征及输送过程 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 108–117.
- [25] 金莉莉, 李振杰, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘夏季典型晴天近地层湍流能谱特征 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 1–12.
- [26] 赵佳伟, 何清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地秋季陆面过程特征 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(4): 159–167.
- [27] 李祥余, 何清, 艾力·买买提明, 等. 塔中春季晴天近地层温度、湿度和风速廓线特征 [J]. *干旱区地理*, 2008, 31(3): 389–396.
- [28] 刘强, 何清, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季大气稳定度垂直分布特征分析 [J]. *干旱气象*, 2009, 27(4): 308–313.
- [29] Wang M Z, Wei W, He Q, et al. Summer atmospheric boundary layer structure in the hinterland of Taklimakan Desert, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(6): 846–860.
- [30] 张建涛, 何清, 王敏仲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地夜间稳定边界层观测个例分析 [J]. *高原气象*, 2018, 37(3): 826–836.
- [31] 张建涛, 王敏仲, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地夏季夜间低空急流变化特征 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 89–100.
- [32] Wei W, Wang M Z, Zhang H S, et al. Diurnal characteristics of turbulent intermittency in the Taklimakan Desert [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2019, 131(3): 287–297.
- [33] 朱从祯, 赵天良, 孟露, 等. 浮尘气溶胶对沙漠大气边界层结构作用的昼夜差异 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1017–1026.
- [34] 魏文寿, 王敏仲, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地近地边界层温湿廓线与热量平衡分析 [J]. *科学通报*, 2008, 53(增刊2): 18–24.
- [35] 何清, 金莉莉. 塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验成果概述 [J]. *新疆大学学报(自然科学版, 中英文)*, 2021, 38(3): 334–354.
- [36] 孔丹. 塔克拉玛干沙漠腹地2007年春季夏季辐射及沙尘气溶胶特征分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2008.
- [37] 李振杰. 塔克拉玛干沙漠塔中近地层湍流特征研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010.
- [38] 赵佳伟. 塔克拉玛干沙漠腹地高大沙垄微气象观测研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2020.
- [39] Liu S Y, Liang X Z. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(21): 5790–5809.
- [40] Coen M C, Praz C, Haeffele A, et al. Determination and climatology of the planetary boundary layer height above the Swiss plateau by in situ and remote sensing measurements as well as by the COSMO-2 model [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 13205–13221.
- [41] 田野, 刘旭林, 于永涛, 等. 北京城区大气边界层高度的反演研究 [J]. *气象科技*, 2022, 50(1): 9–20.
- [42] 许智棋. 土壤湿度和海拔高度对中国夏季边界层高度的影响及其区域性差异 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [43] 涂静. 黄东海大气边界层高度时空变化特征 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [44] Hyun Y K, Kim K E, Ha K J. A comparison of methods to estimate the height of stable boundary layer over a temperate grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(1/2): 132–142.
- [45] Sun H J, Shi H R, Chen H Y, et al. Evaluation of a method for calculating the height of the stable boundary layer based on wind profile lidar and turbulent fluxes [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3596.
- [46] 王雨婷. 中国大气边界层高度特征研究及一次台风大涡模拟试验 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

## Calculation and analysis of summer stable boundary layer height in the hinterland of Taklimakan Desert, China

Yang Guocheng<sup>1,2</sup>, Mao Donglei<sup>1</sup>, Wang Minzhong<sup>2</sup>, Zhang Jiantao<sup>2</sup>, Pan Honglin<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Tourism / Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Region, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. National Observation and Research Station of Taklimakan Desert Meteorology of Xinjiang / Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of China Meteorological Administration / Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi Desert Meteorological Institute, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** In this paper, using the encrypted sounding observation data of Tazhong observation station in Taklimakan Desert on July 6–17, 2021, the stable boundary layer height was calculated by using Coen method, Rib method, Liu-Liang method and inversion intensity method respectively, and the differences among the calculation results of different methods were compared, and the relationships between near-surface meteorological factors and the height of stable boundary layer is analyzed in combined with 80 m observation tower gradient detection system data. The results show that: (1) During the experiment, the height of stable boundary layer in the hinterland of Taklimakan Desert was less than 1 000 m. The average height calculated by the four methods was 141, 269, 227, 173 m respectively, and the total average height was 202.38 m. The stable boundary layer began to develop after sunset and developed to the thickest around sunrise, and the average height of the stable boundary layer calculated by the four methods increased from 49, 257, 164, 121 m at 22:15 to 220, 290, 242, 188 m at 07:15, respectively. (2) The overall trend of the stable boundary layer height calculated by the four methods is consistent, but there are individual extreme values, and the extreme values are mostly related to special weather phenomena. The height distribution range (10–890 m) of stable boundary layer calculated by Rib method is larger than that calculated by the other three methods, which may be due to the consideration of both thermodynamic and dynamic factors. The heights calculated by the other three methods are slightly lower, probably because the boundary layer development is not uniform at each time, the four-time average at night lowers the overall average and is affected by the intensity of surface radiation cooling and turbulent motion during different observation cases. (3) The stable boundary layer height calculated by the four methods under different weather conditions is also different. Under clear night conditions, the average deviation of the stable boundary layer height calculated by the four methods is the smallest, and the height change trend is similar. In dust weather, the average deviation of the stable boundary layer height calculated by the four methods is in the middle, and the height difference is mainly reflected around sunrise or sunset. In the case of rainy days, affected by the changes of meteorological elements in the boundary layer, the overall height calculated by the four methods is quite different, and the average deviation is also the largest. (4) In sunny days, the stable boundary layer height determined by the Coen method shows a significant increase process, which can fully describe the development and change process of the stable boundary layer at night. There is almost no sudden increase or decrease in the abnormal height value, which is suitable for sunny days with significant thermal effects. Under special weather conditions, the Rib method is recommended. This method considers both the thermal effect and the dynamic effect. It is a comprehensive parameter that covers wind, temperature and humidity at the same time. The calculated boundary layer height has the least uncertainty and is easier to reduce the error. (5) The height of stable boundary layer in the desert hinterland is jointly affected by dynamic and thermal factors, and is significantly correlated with turbulent kinetic energy, wind speed, ground temperature and soil heat flux, with the maximum correlation coefficients of 0.9, 0.88, 0.63 and 0.5.

**Key words:** stable boundary layer height; calculation method; influence factor; Taklimakan Desert