

引用格式:杨霞,何清,赵克明,苏亚乔. 基于加密探空资料的塔里木东风低空急流特征[J]. 山地学报, 2023, 41(6): 836-845.

YANG Xia, HE Qing, ZHAO Keming, SU Yaqiao. Characteristics of easterly low-level jet over Tarim based on encrypted radiosonde observations [J]. Mountain Research, 2023, 41(6): 836-845.

## 基于加密探空资料的塔里木东风低空急流特征

杨霞<sup>1</sup>, 何清<sup>2</sup>, 赵克明<sup>1</sup>, 苏亚乔<sup>1</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区气象台, 乌鲁木齐 830002; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 塔里木东风低空急流位于中国西北干旱区, 是造成新疆沙尘暴、暴雨、强对流等灾害性天气的直接影响因素。研究塔里木东风低空急流, 一般基于每日两次的常规观测资料, 时间分辨率较粗, 不能完整反映其特征。本文利用 2022 年 5 月 1 日至 30 日新疆首次开展的大范围加密探空观测资料, 揭示塔里木东风低空急流的精细特征及其与南疆降水的关系。结果表明: (1) 加密观测期间, 共出现 17 个塔里木东风低空急流日 (占总观测日数的 56.7%); 与常规探空观测时次 (00:00 UTC 和 12:00 UTC) 相比, 两个加密观测时次 (06:00 UTC 和 18:00 UTC) 观测到的塔里木东风低空急流的总次数更多。 (2) 在 6 个加密观测站中, 仅若羌、库尔勒和民丰观测到塔里木东风低空急流; 在同一时次, 最多观测到两个站点同时出现塔里木东风低空急流。 (3) 若羌站出现塔里木东风低空急流的次数最多, 平均风速最大, 平均急流高度最高, 急流的强度等级最强; 库尔勒站其次。塔里木东风低空急流在若羌站呈现明显的入夜加强, 正午减弱的特征; 在库尔勒站和民丰站的昼夜变化不明显。 (4) 2022 年 5 月南疆 70.0% 以上的降水日中有塔里木东风低空急流, 暴雨日中塔里木东风低空急流的出现率高达 83.3%; 有塔里木东风低空急流影响时, 南疆的降水范围更广, 降水强度更大。研究结果可加深对干旱区低空急流的认识, 并为南疆防灾减灾提供参考。

**关键词:** 东风低空急流; 探空观测; 降水; 塔里木盆地; 南疆

**中图分类号:** P442

**文献标志码:** A

低空急流对全球天气和气候具有重要影响<sup>[1-4]</sup>。低空急流通常指位于边界层或对流层低层的一股强而窄的气流带<sup>[5-8]</sup>, 它可以改变动量、热量、水汽和污染物等的垂直输送, 是引起极端强降水事件<sup>[9-11]</sup>和触发深对流的关键因子<sup>[12-14]</sup>, 而且与航空安全、风能利用等密切相关<sup>[15-17]</sup>。20 世纪 70 年代, 美国气象学者<sup>[18]</sup>利用常规探空观测资料首次提出了低空急流的判识标准, 揭示了美国低空急流的气候特征。此后, 有研究<sup>[19]</sup>通过连续加密探空观测实验, 进一步分析了美国低空急流的形态结构和演变规律等精细特征。中国的低空急流研究始于 20 世纪 70 年代, 由于加密探空观测的成本较高, 大

多研究都基于常规探空资料开展。研究发现<sup>[20-22]</sup>, 中国低空急流的季节变化明显, 日变化特征存在区域差异, 江南地区和东北地区是中国低空急流的两个活动中心。低空急流是造成中国暴雨的重要低层天气系统, 研究表明<sup>[1]</sup>华南地区初夏 70% 以上的暴雨与低空急流相关, 江淮地区梅雨期间二者的相关性高达 80%。

塔里木东风低空急流位于中国西北干旱区<sup>[23-27]</sup>, 急流轴呈准东西向分布, 具有明显的季节变化, 春 (冬) 季的急流日数最多 (少), 风速最大 (小), 垂直风切变最强 (弱)。塔里木东风低空急流对新疆天气和气候有重要影响<sup>[28-30]</sup>, 是造成新疆沙

收稿日期 (Received date): 2023-06-18; 改回日期 (Accepted date): 2023-11-22

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42065001, 42030612)。[National Natural Science Foundation of China (42065001, 42030612)]

作者简介 (Biography): 杨霞 (1980 -), 女, 新疆阿图什人, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向: 灾害性天气机理。[YANG Xia (1980 -), female, born in Atushi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, M. Sc., professor of engineering, research on the mechanism of disastrous weather] E-mail: yangxia921@163.com

尘暴、暴雨、强对流等灾害性天气的直接影响因素<sup>[31-34]</sup>。

新疆南部(以下简称“南疆”)是典型干旱区,每年出现的暴雨次数远不及中国东部地区,但该区域的暴雨强度很大,1小时的降水量甚至接近该地区的年平均降水量<sup>[35]</sup>,塔里木东风低空急流是导致南疆暴雨的关键因子。南疆地形呈“C”状分布,在暴雨过程中,塔里木东风低空急流从东口进入,使低层气流在南疆西部辐合,形成上升运动,与此同时,低空急流前部的气旋式流场将周边的水汽不断向暴雨区集中,为暴雨提供水汽供应<sup>[28,31]</sup>。

已有研究<sup>[24-26]</sup>基于长时间序列的常规探空观测资料得到了塔里木东风低空急流在年代际、年际和季节等时间尺度上的变化特征,但由于常规探空观测资料的时间分辨率较粗,且研究对象主要为单一的指标站,并不能完整地揭示塔里木东风低空急流的日变化特征和空间分布特征。塔里木东风低空急流在5月出现的频率最高、平均风速最大<sup>[24]</sup>,南疆5月的暴雨过程与塔里木东风低空急流有密切关系<sup>[23]</sup>。为进一步探究塔里木东风低空急流的精细特征及其与南疆降水的关系,2022年5月1日至30日,在塔里木盆地首次开展了为期30天的大范围加密探空观测实验。本次实验,依托南疆现有的常规探空站,在若羌、民丰等6个站点开展了每日4次的加密探空观测。本文利用此次加密探空观测资料,分析2022年5月塔里木东风低空急流的出现频次、风速、高度和强度等要素的日变化特征,揭示上述要素在非常规观测时次与常规观测时次的时空差异,探讨塔里木东风低空急流与南疆降水的关系,以期进一步加深对于干旱区低空急流的认识,为提高南疆干旱区暴雨预报准确率和防灾减灾能力提供支撑。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用的资料包括(1)2022年5月1日至30日,喀什、阿克苏、库尔勒、若羌、民丰、和田6个站点(图1)每日4次(00:00 UTC、06:00 UTC、12:00 UTC和18:00 UTC,UTC为世界时间)的加密探空资料;(2)南疆992个自动气象站逐小时降水资料。新疆气象信息中心对本文使用的资料进行了质控。

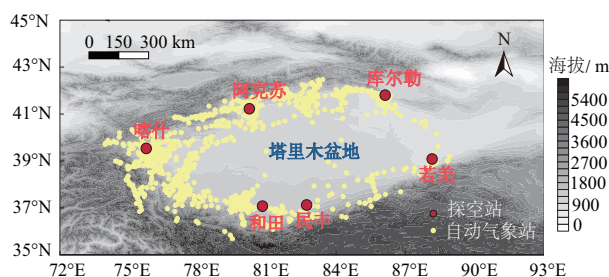


图1 2022年5月南疆加密探空观测站点和自动气象站分布

Fig. 1 Distribution of encrypted radiosonde observation stations and automatic weather stations in southern Xinjiang in May 2022

### 1.2 方法

参考已有研究<sup>[24]</sup>进行如下定义:塔里木东风低空急流指某日00:00、06:00、12:00和18:00这4个时次中,任一时次在距离地面3 km以内,出现风向为 $33^{\circ} \sim 146^{\circ}$ 、风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且最大风速与最小风速的差 $\geq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的现象;低空急流的高度指低空急流出现的距地高度,也是低空急流核(“急流鼻”廓线的顶点)所在的高度;某日塔里木盆地任一站点在任一时次出现了东风低空急流,该日即为一个塔里木东风低空急流日;将南疆1日中出现降水的站数占总站数的比例 $< 20.0\%$ 的降水日记为局地降水日, $\geq 20\%$ 的降水日记为区域降水日。

## 2 结果与分析

### 2.1 频次

2022年5月仅若羌站、库尔勒站和民丰站出现了塔里木东风低空急流,其中,若羌站出现的频次最多(31次),库尔勒站其次(12站),民丰站最少(4次)。从上述3站的空间分布来看(图1),塔里木东风低空急流主要出现在盆地中东部,出现频次呈现自东向西、自南向北减少的特征。从不同时次出现的频次来看(表1),塔里木东风低空急流主要出现在18:00和00:00,在两个加密观测时次(06:00和18:00)出现的塔里木东风低空急流的总次数多于常规探空观测时次(00:00和12:00),这表明加密探空资料能够更加完整地捕捉到塔里木东风低空急流。

2022年5月南疆共出现17个塔里木东风低空急流日(图2),占总观测日数的56.7%,其中,全天4个时次均出现塔里木东风低空急流的天数占急流

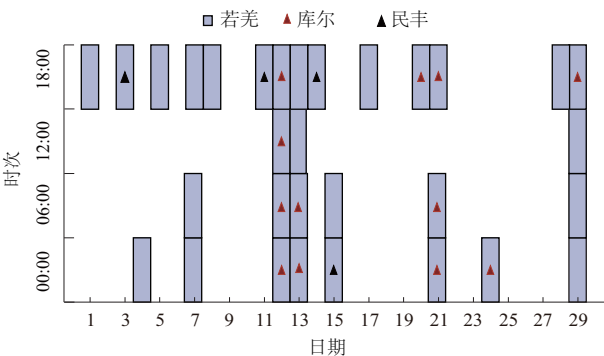


图 2 2022 年 5 月塔里木东风低空急流日分布  
Fig. 2 Occurrence of TELLJ throughout the month of May 2022

总日数的 17.6% ; 全天出现 3 个时次的占 11.8% , 每天仅出现一个时次的占 64.7% 。可见, 2022 年 5 月, 塔里木东风低空急流日在全月的占比虽高, 但在每日的出现时间较短。在同一日同一时次最多观测到 2 个站点同时出现塔里木东风低空急流, 此类急流日数占急流总日数的 52.9% , 夜间至清晨不同站点更易同时出现塔里木东风低空急流。

2.2 风速

从 2022 年 5 月塔里木东风低空急流在南疆各站的风速可以看出 (表 2) , 若羌站的平均风速和极值风速均为最大, 库尔勒站其次, 民丰站最小。可

见, 与出现频次类似, 塔里木东风低空急流的风速也呈现自东向西、自南向北减小的特征。若羌站的平均风速在 00:00 最大, 06:00 最小, 呈现入夜加强, 正午减弱的特征; 库尔勒站和民丰站则无上述日变化特征。此外, 若羌站不同时次的塔里木东风低空急流的最大风速差异较大, 而库尔勒站和民丰站则相对较小。

2.3 高度

由图 3 可见, 2022 年 5 月, 民丰站 4 次塔里木东风低空急流核的高度均未超过 600 m, 其中高度在 400 ~ 500 m 的占比最大, 为 75.0% ; 库尔勒站塔里木东风低空急流核的高度主要分布在距地 400 ~ 500 m 和 100 m 以下的高度, 占比分别为 41.7% 和 33.3% ; 若羌站塔里木东风低空急流核的高度主要分布在 400 ~ 500 m, 占比达 51.6% 。总体来看, 民丰站塔里木东风低空急流核的高度分布相对集中, 若羌站和库尔勒站较为分散。

由表 3 可见, 塔里木东风低空急流的平均高度也呈现自东向西、自南向北降低的特征, 即若羌站最高, 库尔勒站第二, 民丰站最低。塔里木东风低空急流最大高度的南北差异大于东西差异, 例如: 12:00, 若羌站的最大高度为 1513 m, 库尔勒站仅为

表 1 2022 年 5 月南疆各站出现塔里木东风低空急流的频次

Tab. 1 Frequency of the easterly low-level jet over Tarim (TELLJ) at different stations in southern Xinjiang in May 2022

站点	00:00		06:00		12:00		18:00		合计
	次数/次	占比/%	次数/次	占比/%	次数/次	占比/%	次数/次	占比/%	
若羌	8	25.8	6	19.4	3	9.7	14	45.2	31
库尔勒	4	33.3	3	25.0	1	8.3	4	33.3	12
民丰	1	25.5	0	0	0	0	3	75.0	4

表 2 2022 年 5 月南疆各站塔里木东风低空急流的风速

Tab. 2 Wind speed of TELLJ at different stations in southern Xinjiang in May 2022

时次	若羌		库尔勒		民丰	
	最大风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
00:00	28.8	19.7	16.3	14.7	12.2	12.2
06:00	22.1	16.5	17.8	14.4	—	—
12:00	21.5	17.6	15.0	15.0	—	—
18:00	31.9	18.4	18.0	14.2	13.2	11.4
4 个时次	31.9	18.1	18.0	14.6	13.2	11.8

表 3 2022 年 5 月南疆各站塔里木东风低空急流核的高度

Tab. 3 Altitudes of TELLJ core at different stations in southern Xinjiang in May 2022

时次	若羌		库尔勒		民丰	
	最大高度/m	平均高度/m	最大高度/m	平均高度/m	最大高度/m	平均高度/m
00:00	864.8	570.6	577.2	445.2	490.5	490.5
06:00	1584.8	855.5	732.2	467.5	—	—
12:00	1513.0	518.1	199.2	199.2	—	—
18:00	722.8	543.2	1335.2	670.2	509.5	507.3

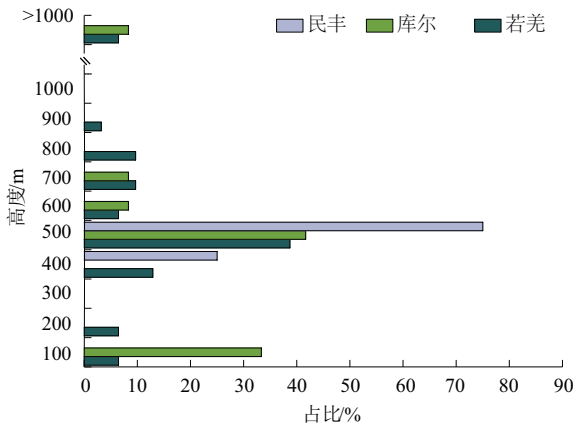


图 3 2022 年 5 月南疆各站塔里木东风低空急流核在不同高度的占比

Fig. 3 Proportional distribution of TELLJ core at different altitudes across various stations in southern Xinjiang in May 2022

199.2 m,南北两站的高度差相差 1313.8 m; 00:00,若羌站的最大高度为 864.8 m,民丰站为 490.5 m,东西两站的高度相差 374.3 m。此外,不同时次塔里木东风低空急流的最大高度在若羌站和库尔勒站的差异较大,民丰站较小。

2.4 等级

低空急流根据最大风速( $V_{\max}$ )和切变(最大风速与最小风速的差 $\Delta V$ )可划分为 4 个等级(I 级至 IV 级)<sup>[18-19]</sup>,随着最大风速和切变的增加,低空急流的强度也随之增加。本文使用的低空急流等级之间相互独立,即 I 级中不包括属于 II 级、III 级和 IV 级的急流。由表 4 可见,2022 年 5 月仅若羌站出现了 4 种强度的低空急流,其中强度为 IV 级的塔里木东风低空急流也仅在若羌站出现。从各等级的分布来看,若羌站的 IV 级塔里木东风低空急流出现次数最多(14 次),III 级最少(3 次);库尔勒站 II 级最多(7 次),I 级最少(2 次);民丰站的塔里木东风低空

急流均为 I 级。可见,2022 年 5 月若羌站的塔里木东风低空急流强度最强,库尔勒站其次,民丰站最弱。

表 4 2022 年 5 月南疆各站不同强度塔里木东风低空急流的次数

Tab. 4 The frequency of TELLJ with different intensities at different stations in southern Xinjiang in May 2022 (单位:次)

等级	若羌	库尔勒	民丰
I 级	6	2	4
II 级	8	7	—
III 级	3	3	—
IV 级	14	—	—

由图 4 可以看出,2022 年 5 月若羌站 II 级(占比 87.5%)和 IV 级(78.6%)的塔里木东风低空急流主要出现在夜间和清晨,I 级(66.6%)和 III 级(66.7%)则主要出现在清晨和中午。库尔勒站 I 级的塔里木东风低空急流只出现在中午(50.0%)和夜间(50.0%);II 级主要出现在清晨(42.9%),III 级除傍晚未出现外,其余时段均有出现。民丰站的塔里木东风低空急流均为 I 级,且仅出现在夜间和清晨。综上,塔里木东风低空急流的强度无明显的日变化特征。

2.5 塔里木东风低空急流与南疆降水的关系

如图 5 所示,在 2022 年 5 月加密探空观测期间南疆降水频繁,降水日数达 27 d,其中区域降水日 14 d,局地降水日 13 d。在南疆 27 个降水日中,有 15 天伴有塔里木东风低空急流,占比为 55.6%;塔里木东风低空急流日数与南疆降水量的相关系数达 0.36,通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验。在南疆 14 个区域降水日中,有 10 天伴有塔里木东风低空急流,占



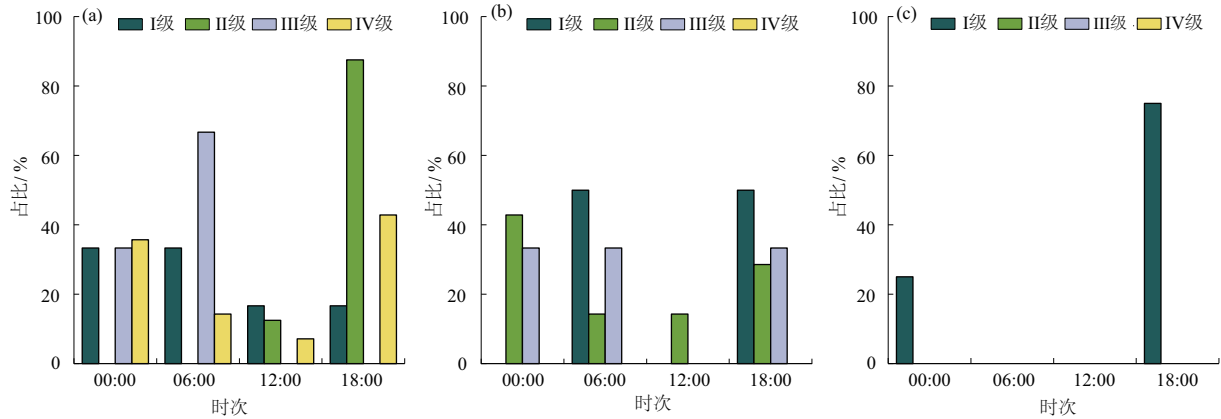
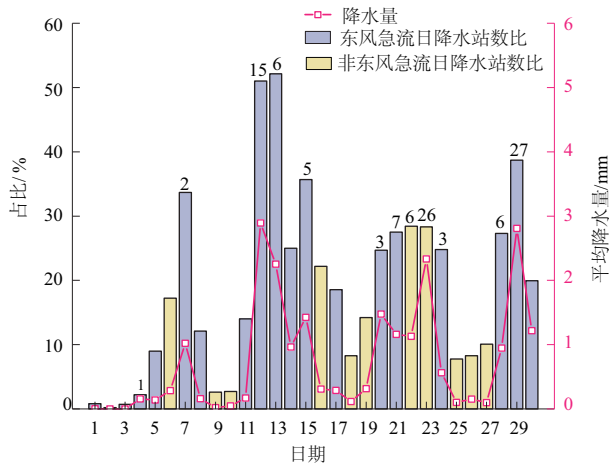


图 4 2022 年 5 月南疆各站不同强度塔里木东风低空急流在不同时次的占比:(a)若羌站;(b)库尔勒站;(c)民丰站

Fig. 4 Proportional distribution of different intensity of TELLJ in different times in May 2022

(a) Wujia Station; (b) Korla Station; (c) Minfeng Station



柱状图上的黑色数字为当日出现的暴雨站数。

图 5 2022 年 5 月南疆逐日降水量和降水站数占总站数的比例分布

Fig. 5 Distribution of daily precipitation in southern Xinjiang in May 2022 and the proportion of precipitation stations to total stations

比为 71.4%;在 13 个局地降水日中,仅 5 天伴有塔里木东风低空急流,占比为 38.5%。可见,塔里木东风低空急流在南疆区域降水日中的出现比例明显高于局地降水日。进一步分析南疆区域平均降水量与塔里木东风低空急流的关系,可以看出,2022 年 5 月南疆有 10 天的区域平均降水量超过 1.0 mm,其中 7 天伴有塔里木东风低空急流,占比达 70.0%。2022 年 5 月南疆共出现 12 个暴雨日,其中 10 天伴有塔里木东风低空急流,占比达 83.3%。综上所述可知,塔里木东风低空急流与南疆降水的关系密切,2022 年 5 月超过一半的南疆降水日中都出现了塔

里木东风低空急流,随着降水强度的增加,塔里木东风低空急流的出现率显著增加,伴有塔里木东风低空急流的南疆降水,范围更广、强度更强。

为明确塔里木东风低空急流与南疆降水的关系,对 2022 年 5 月南疆 10 次伴有塔里木东风急流的区域降水日的物理量进行合成分析(图 6a),在南疆区域降水日中,塔里木东风低空急流从东路将水汽不断向西输送,由于南疆三面环山,低层水汽不断在南疆西部辐合,850 hPa 水汽通量散度中心值达  $-2.5 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}$ ,为降水提供了充沛的水汽条件。此外,在南疆区域降水日中,塔里木东风低空急流与南疆西部的偏西气流在盆地中西部相遇,使低层气流辐合上升,最大垂直上升速度达  $-0.6 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为降水提供了有利的动力条件(图 6b)。可见,塔里木东风低空急流在南疆降水过程中发挥了重要作用。目前,塔里木东风低空急流对南疆降水作用的大尺度环流特征已基本清晰<sup>[23,34-35]</sup>,但急流的空间差异对降水的影响以及低空急流的脉动对造成强降水的中小尺度天气系统的影响还不明确,还需进一步深入研究。

### 3 讨论

(1)常规探空资料显示,塔里木东风低空急流主要出现在清晨(00:00)<sup>[35]</sup>,数值模拟研究发现塔里木东风低空急流在夜间出现的频次多于白天<sup>[37]</sup>。本文的研究结果表明,2022 年 5 月若羌、库尔勒和民丰 3 站在夜间至清晨出现的塔里木东风低空急流

的次数均多于上午至傍晚,该结果补充了常规探空观测缺乏夜间数据的不足,也从观测角度证实了数值模拟给出的塔里木东风低空急流日变化特征的准确性。

(2)2022年5月在两个加密观测时次观测到的塔里木东风低空急流的总次数多于常规探空观测时次,这反映出目前中国的常规高空探测时间与塔里木东风低空急流的高频出现时间不一致,无法全面捕捉到低空急流的发展和演变特征,从而导致暴雨和强对流等灾害性天气预报出现空报或漏报,影响区域防灾减灾能力提升。

(3)2022年5月29日(27站)和23日(26站)

南疆出现的暴雨站数最多(图5),但23日的暴雨中并未出现塔里木东风低空急流。进一步分析若羌站5月29日和23日的垂直风场可以看出(图7),29日00:00,若羌站距地3 km以内的高度均为偏东风,近地层的偏东风风速较小,在距离地面120 m左右的高度风速突然增加至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,达到低空急流的风速标准,在860 m左右的高度东风风速达到最大( $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),随后风速逐渐减少,在1950 m左右的高度风速降低至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,偏东风的风速切变超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,东风低空急流的强度达LLJ-4级。23日00:00,若羌站从地面到1150 m的高度均为偏西风,1150 m以上到3000 m

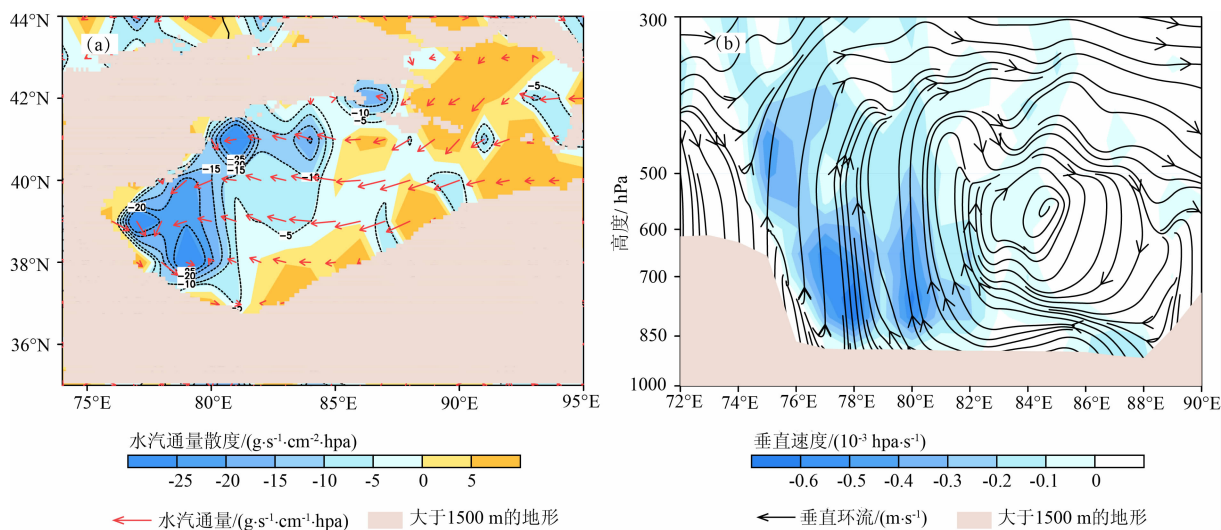


图6 2022年5月南疆有塔里木东风低空急流的区域降水日合成分析:

(a)850 hPa水汽通量和水汽通量散度;(b)沿39.2°N的垂直环流

Fig. 6 Synthetic analysis of regional precipitation on days with TELLJ in southern Xinjiang in May 2022:

(a) 850 hPa water vapor flux and water vapor flux divergence; (b) vertical circulation along 39.2°N

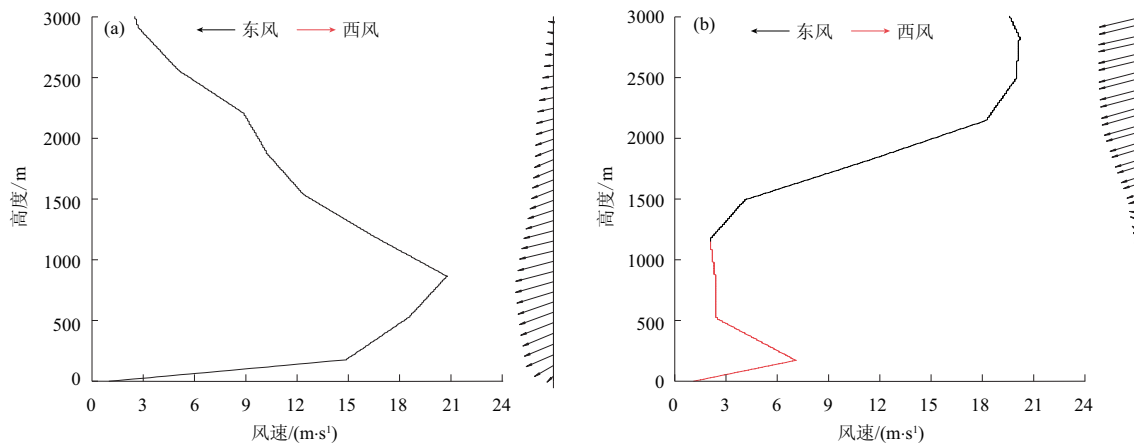


图7 2022年若羌站垂直风速分布:(a)5月29日00:00 UTC;(b)5月23日00:00 UTC

Fig. 7 Vertical distribution of wind speeds at Ruqiang station in 2022: (a) May 29th 00:00 UTC; (b) May 23rd 00:00 UTC

均为偏东风,在距离地面 1760 m 的高度偏东风风速增加至  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,达到低空急流的风速标准,并从此高度开始风速随高度逐渐增加,在 2800 m 的高度处达到最大 ( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),随后风速随高度略有减少,在 3000 m 的高度偏东风的风速降低至  $19.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,5 月 23 日的东风风速虽然达到了低空急流的标准,但风速的切变不足  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,远低于低空急流的判别标准,因此 5 月 23 日的偏东风并不能称为东风低空急流,其垂直结构与典型的低空急流存在显著差异,此类东风造成的南疆暴雨的形成机制也与典型的塔里木东风低空急流不同,需要进一步研究。

塔里木东风低空急流位于内陆干旱区,其空间结构及对暴雨、强对流等灾害性天气的影响机制与我国季风区低空急流不同,具有一定的独特性;目前的常规探空观测,不能满足对塔里木东风低空急流精细结构的研究需求,加密探空观测,虽增加了观测时次,但时空分辨率仍然较粗,随着中国气象现代化水平的不断提高,风廓线雷达等新型垂直探测仪器布设不断完善,下一步将利用高时空分辨率的新型垂直探测资料深入开展塔里木东风低空急流精细结构的相关研究。

#### 4 结 论

(1)2022 年 5 月,南疆共出现 17 个塔里木东风低空急流日,占总观测日数的 56.7%;塔里木东风低空急流在每日的出现时间较短,约 65.0% 的塔里木东风低空急流日中,仅有一个时次出现了急流。在两个加密观测时次(06:00 和 18:00)观测到的东风低空急流的总次数多于常规探空观测时次(00:00 和 12:00)。可见,常规探空观测无法全面反映塔里木东风低空急流的特征。

(2)塔里木东风低空急流主要出现在盆地中东部(若羌站、库尔勒站和民丰站),在同一日同一时次最多同时观测到 2 个站点出现塔里木东风低空急流,此类塔里木东风低空急流的占比为 52.9%,夜间至清晨不同站点更易同时出现塔里木东风低空急流。

(3)塔里木东风低空急流的出现频次、平均风速、急流高度和强度均呈现自东向西、自南向北减小的特征。低空急流的最大风速和急流高度的差异在盆地东部较大,急流风速在盆地东部还呈现明显的入夜加强,正午减弱的特征。

(4)塔里木东风低空急流在南疆降水中发挥了重要作用,超过 70.0% 的区域降水日中都出现了塔里木东风低空急流;暴雨日中塔里木东风低空急流出现的比例高达 83.3%,有塔里木东风低空急流影响的南疆降水范围更大,降水强度也更强。

#### 参考文献 (References)

- [1] 孙淑清, 马廷标, 孙纪改. 低空急流与暴雨相互关系的对比分析[J]. 气象学报, 1979, **37**(4): 36–44. [SUN Shuqing, MA Tingbiao, SUN Jigai. On the relation between the low level jet and rainstorm [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1979, **37**(4): 36–44]
- [2] 苗爱梅, 武捷, 赵海英, 等. 低空急流与山西大暴雨的统计关系及流型配置[J]. 高原气象, 2010, **29**(4): 39–946. [MIAO Aimei, WU Jie, ZHAO Haiying, et al. Statistical relation and flow pattern of low-level jet and heavy rainstorm in Shanxi [J]. Plateau Meteorology, 2010, **29**(4): 939–946]
- [3] 李超, 隆霄, 曹怡清, 等. 贺兰山东麓 20 次暴雨过程环流形势及低空急流特征[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(6): 1753–1767. [LI Chao, LONG Xiao, CAO Yiqing, et al. Circulation pattern and LLJ characteristics of 20 rainstorm events in the eastern reign of the Helan Mountain [J]. Arid Zone Research, 2022, **39**(6): 1753–1767] DOI: 10.13866/j.azr.2022.06.06
- [4] 王东阡, 张耀存. 中国东部西南低空急流日变化特征及其机制[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(8): 2498–2507. [WANG Dongqian, ZHANG Yaocun. Diurnal variation of the south-westerly low-level jet over eastern China and its mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, **55**(8): 2498–2507] DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.08.002
- [5] 刘鸿波, 何明洋, 王斌, 等. 低空急流的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2014, **72**(2): 191–206. [LIU Hongbo, HE Mingyang, WANG Bin, et al. Advances in low-level jet research and future prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, **72**(2): 191–206] DOI: 10.11676/qxb2014.022
- [6] 李兴生, 叶卓佳, 刘林勤. 夜间低空急流的分析研究[J]. 大气科学, 1981, **5**(3): 310–317. [LI Xingsheng, YE Zhuojia, LIU Linqin. An analytical research on the lower nocturnal jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1981, **5**(3): 310–317]
- [7] 郝为锋, 王庆安, 苏晓冰, 等. 丘陵山区低空急流特性分析[J]. 气象科学, 1996, **16**(3): 256–263. [HAO Weifeng, WANG Qing'an, SU Xiaobing. The analysis of the characteristic of low-level-jet (LLJ) in hilly area [J]. Journal of Meteorological Sciences, 1996, **16**(3): 256–263]
- [8] 赛瀚, 苗峻峰. 中国地区低空急流研究进展[J]. 气象科技, 2012, **40**(5): 766–771. [SAI Han, MIAO Junfeng. A review of low-level jet research in China [J]. Meteorological Science and Technology, 2012, **40**(5): 766–771]
- [9] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 255. [TAO Shiyen. China's heavy rainfall [M]. Beijing: Science Press,

- 1980: 255]
- [10] 林志东, 陈兴伟, 林木生, 等. 东南沿海西溪流域暴雨洪水的时空变化特征[J]. 山地学报, 2017, **35**(4): 488–495. [LIN Zhidong, CHEN Xingwei, LIN Musheng, et al. Temporal and spatial variations of storm-floods in Xixi watershed of southeast coastal region [J]. Mountain Research, 2017, **35**(4): 488–495] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000246
- [11] 王文, 马超, 张志, 等. 北京云蒙山片区“7·16”群发性暴雨泥石流特征研究[J]. 山地学报, 2022, **40**(4): 626–636. [WANG Wen, MA Chao, ZHANG Zhi, et al. The characteristics of rainstorm-induced clustering debris flows on July 16, Yumeng Mountain, Beijing, China [J]. Mountain Research, 2022, **40**(4): 626–636] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000698
- [12] 朱乾根, 周伟灿, 张海霞. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究[J]. 南京气象学院学报, 2001, **24**(3): 308–314. [ZHU Qiangen, ZHOU Weican, ZHANG Haixia. Mechanism of the formation of torrential rain by coupled high/low level jets over the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, **24**(3): 308–314]
- [13] 孙淑清, 翟国庆. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 1980, **4**(4): 327–337. [SUN Shuqing, ZHAI Guoqing. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy rain-storms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1980, **4**(4): 327–337]
- [14] 何雪莉, 李亚男, 石天宇, 等. 1961—2018年太行山东西侧降水变化[J]. 山地学报, 2022, **40**(1): 43–55. [HE Xueli, LI Yanan, SHI Tianyu, et al. Precipitation changes to the eastern and western sides of the Taihang Mountains from 1961 to 2018 [J]. Mountain Research, 2022, **40**(1): 43–55] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000654
- [15] 梁捷宁, 张镭, 田鹏飞, 等. 黄土高原复杂地形上边界层低空急流对近地层湍流的影响[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(5): 1387–1398. [LIANG Jiening, ZHANG Lei, TIAN Pengfei, et al. Impact of low-level jets on turbulent in nocturnal boundary layer over complex terrain of the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, **57**(5): 1387–1398] DOI: 10.6038/cjg20140504
- [16] 陈晋北, 吕世华, 余晔. 绿洲和戈壁近地面层热量和物质输送特征对比[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(6): 1817–1830. [CHEN Jinbei, LYU Shihua, YU Ye. Comparison of heat and matter transfer characteristics in the surface layers of oasis and Gobi [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, **55**(6): 1817–1830] DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.003
- [17] 肖之盛, 孟凡, 徐峻, 等. 低空急流理论及其对空气污染物传输影响研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2019, **9**(2): 111–118. [XIAO Zhisheng, MENG Fan, XU Jun, et al. Research advances in Low-Level Jets theory and their impact on air pollutant transmission [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, **9**(2): 111–118] DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.2018.11.200
- [18] BONNER W D. Climatology of the low level jet [J]. Monthly Weather Review, 1968, **96**(12): 833–850.
- [19] WHITEMAN C D, BIAN Xindi, ZHONG Shiyuan. Low-level jet climatology from enhanced rawinsonde observations at a site in the southern Great Plains [J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, **36**(10): 1363–1376.
- [20] 李佳. 初夏华南低空急流及其日变化对华南降水的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021: 58–59. [LI Jia. Influence of low-level jets in southern China in early summer and their diurnal variation on precipitation in southern China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021: 58–59]
- [21] 王蕾, 张文龙, 周军. 中国西南低空急流活动的统计分析[J]. 南京气象学院学报, 2003, **26**(6): 797–805. [WANG Lei, ZHANG Wenlong, ZHOU Jun. Statistic analysis on the south-westerly LLJ in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, **26**(6): 797–805]
- [22] 赛瀚. 环渤海地区低空急流时空结构特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012: 42–63. [SAI Han. The spatial-temporal structure characteristics of low-level jet over Bohai rim [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012: 42–63]
- [23] 邓子凤. 干旱、半干旱地区低空急流特征与暴雨关系的研究[J]. 新疆气象, 1990, **13**(12): 1–8. [DENG Zifeng. Study on the characteristics of low-level jets and their relationship with heavy rain in arid and semi-arid regions [J]. Xinjiang Meteorology, 1990, **13**(12): 1–8]
- [24] 杨霞, 周鸿奎, 赵克明, 等. 塔里木东风低空急流特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, **38**(5): 1216–1225. [YANG Xia, ZHOU Hongkui, ZHAO Keming, et al. Analysis of the characteristics of the easterly low-level jet in Tarim [J]. Arid Zone Research, 2021, **38**(5): 1216–1225] DOI: 10.13866/j.azr.2021.05.03
- [25] 刘华悦, 葛赜铭, 黄建平. 塔克拉玛干低空急流特征分析[J]. 干旱气象, 2015, **33**(3): 405–411+420. [LIU Huayue, GE Jinming, HUANG Jianping. Characteristics of low level jet over the Taklimakan Desert [J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, **33**(3): 405–411+420] DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-03-0405
- [26] 王柯, 何清, 王敏仲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地特征层风场特征[J]. 干旱气象, 2011, **29**(3): 302–305. [WANG Ke, HE Qing, WANG Minzhong, et al. Wind field feature of characteristic layer in the hinterland of the Taklimakan Desert [J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, **29**(3): 302–305]
- [27] 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. [ZHANG Jiantao, WANG Minzhong, HE Qing, et al. Variation



- characteristics of nocturnal low-level jet in summer over the hinterland of Taklimakan Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, **40**(5): 89 – 100] DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00056
- [28] 邓子凤, 王扣兰, 王政宇. 塔里木东风低空急流与南疆降水 [J]. *气象*, 1982(2): 7 – 10. [DENG Zifeng, WANG Koulan, WANG Zhengyu. Low-level jets in the eastern Tianshan Mountains and precipitation in southern Xinjiang [J]. *Meteorology*, 1982 (2): 7 – 10]
- [29] YAO Junqiang, CHEN Yaning, GUAN Xuefeng, et al. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, **226**: 103957. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103957
- [30] ZHAO Yong, YU Xiaojing, YAO Junqiang, et al. The concurrent effects of the South Asian monsoon and the plateau monsoon over the Tibetan Plateau on summer rainfall in the Tarim Basin of China [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, **39**: 74 – 88. DOI: 10.1002/joc.5783
- [31] 杨霞, 张云惠, 张超, 等. 南疆西部“5·21”极端大暴雨成因分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2020, **14**(1): 21 – 30. [YANG Xia, ZHANG Yunhui, ZHANG Chao, et al. Causation analysis of the 21 May 2018 torrential rain in the west of southern Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2020, **14**(1): 21 – 30] DOI: 10.12057/j.issn.1002-0799.2020.01.003
- [32] 孙颖姝. 低空急流与新疆强降水的关系 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019: 22 – 41. [SUN Yingshu. The relationship between low-level jet and heavy precipitation in Xinjiang [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019: 22 – 41]
- [33] 倪明霞, 段峥嵘, 夏建新. 新疆南疆周边高山冰川融化及其未来水资源安全风险 [J]. *山地学报*, 2022, **40**(3): 329 – 342. [NI Mingxia, DUAN Zhengrong, XIA Jianxin. Melting of mountain glacier and its risk to future water resources in southern Xinjiang, China [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(3): 329 – 342] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000675
- [34] 张俊兰, 杨霞, 施俊杰. 青藏高原天气系统对昆仑山北坡一次罕见暴雨过程影响分析 [J]. *高原气象*, 2021, **40**(5): 1002 – 1011. [ZHANG Junlan, YANG Xia, SHI Junjie. Analysis of the influence of the Qinghai-Xizang Plateau weather system on a rare rainstorm process on the northern slope of Kunlun Mountain [J]. *Plateau Meteorology*, 2021, **40**(5): 1002 – 1011] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00111
- [35] 张家宝, 邓子凤. 新疆降水概论 [M]. 北京: 气象出版社, 1987: 1 – 400. [ZHANG Jiabao, DENG Zifeng. Introduction to precipitation in Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987: 1 – 400]
- [36] YAN Yan, CAI Xuhui, WANG Xuesong, et al. Low-level jet climatology of China derived from long-term radiosonde observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**: e2021JD035323. DOI: 10.1029/2021JD035323
- [37] DU Yu, ZHANG Qinghong, CHEN Yileng, et al. Numerical simulations of spatial distributions and diurnal variations of low-level jets in China during early summer [J]. *Journal of Climate*, 2014, **27**(5): 574715767. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00571.1

## Characteristics of Easterly Low-Level Jet over Tarim Based on Encrypted Radiosonde Observations

YANG Xia<sup>1</sup>, HE Qing<sup>2</sup>, ZHAO Keming<sup>1</sup>, SU Yaqiao<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Low-level jet typically refers to a strong and narrow air current existed in a boundary layer or lower troposphere. Low-level jet has a significant impact on global weather and climate. The easterly low-level jet over Tarim (hereinafter abbreviated as TELLJ) is formed in the arid region of northwest China, which plays a crucial role in creating regional catastrophic weather, such as sandstorms, heavy rainfall, and strong convection in Xinjiang. Past research on TELLJ primarily relies on routine twice-daily observational data with coarse temporal resolution, which cannot fully capture its behavior.

In this paper, the fine features of TELLJ and its relationship with precipitation in southern Xinjiang was

revealed by using the first-hand data of large-scale encrypted radiosonde observation conducted for the first time in Xinjiang from May 1 to May 30, 2022, which included daily variation of TELLJ, and the differences in occurrence frequency, wind speed, height, and intensity between conventional and unconventional observation times.

It found that (1) during the encrypted observation period, a total of 17 days with occurrences of TELLJ appeared, accounting for 56.7% of the total observation days; more occurrences of TELLJ was recorded at two encrypted observation times (06:00 UTC and 18:00 UTC) than those observed at routine radiosonde observation times (00:00 UTC and 12:00 UTC). (2) Among the six encrypted observation stations, only at Ruoqiang, Korla, and Minfeng, TELLJ was recorded; at the same observation time, TELLJ was observed simultaneously at most two stations. (3) TELLJ occurred frequently at Ruoqiang with the highest average wind speed, the highest average jet height, and the strongest intensity; and similarly at Korla it followed the pattern. At Ruoqiang, TELLJ exhibited a distinct pattern of strengthening at night and weakening around noon, whereas there was little diurnal variation at Korla and Minfeng. (4) In May 2022, during more than 70.0% of precipitation days in southern Xinjiang it could witness TELLJ, and the occurrence rate of TELLJ in heavy rains was as high as 83.3%. In case of any TELLJ in southern Xinjiang, there would be a tendency of broader spatial distribution and higher intensity of precipitation.

It could be concluded that the spatial structure of TELLJ and its contribution to catastrophic weather events such as heavy rainfall and severe convective phenomena differ distinctly from those in China's monsoon regions. This study can deepen the understanding of low-level jets in arid regions and provides references for disaster prevention and mitigation in southern Xinjiang, China.

**Key words:** easterly low level jet; radiosonde observation; rainfall; the Tarim basin; southern Xinjiang

(责任编辑 钟雨倩)