

1 投稿时间：2022-12-08 T12:10

2 文章创新点和重要意义：

3 中昆仑山北坡位于南疆塔里木盆地南缘，北临塔克拉玛干沙漠，南接青藏高原，是欧亚
4 大陆极端干旱地区之一。近年来，中昆仑山北坡暴雨多发，暴雨引发的泥石流、山体滑坡等
5 次生灾害给当地带来了严重的人员伤亡和经济损失。以往针对南疆地区暴雨研究多集中在南
6 疆西部地区，给出了暴雨发生的环流配置、多尺度天气系统相互作用、动、热力场和水汽输
7 送等相关研究成果，但对于中昆仑山北坡暴雨水汽输送及其与大尺度环流异常关系的研究相
8 对较少。本文选取 2019 年 6 月 24 日-26 日中昆仑山北坡一次极端暴雨天气过程，利用
9 HYSPLIT 轨迹追踪模式和 ERA-Interim 空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料，诊断分析了强降
10 水期间大气水汽输送特征，阐明了大尺度水汽输送和大气环流异常间的联系，指出了对流层
11 上层温度异常对暴雨水汽输送过程的可能影响，为更好理解该地区暴雨天气形成机理提供参
12 考依据。

13 利用基于拉格朗日方法的 HYSPLIT 轨迹模式，结合地基 GPS-MET 观测资料，对 2019
14 年 6 月 24-26 日中昆仑山北坡一次持续性暴雨天气大尺度水汽输送特征及水汽源地进行分析，
15 阐明了干旱区强降水期间大尺度环流异常与水汽接力输送过程的关系。结果表明，降水前副
16 热带高压位置异常偏西，副高外围偏南气流造成高原增湿明显。强降水期间，副高继续向西
17 北伸展，低纬度水汽沿印度夏季风环流向北输送，经青藏高原接力输送至暴雨区，与塔什干
18 低涡前偏南气流共同构成了中昆仑山北坡持续性强降水的水汽输送通道，水汽接力输送造成
19 暴雨区 PWV 出现两次急剧增湿过程，测站 PWV 峰值达到气候平均值近 2 倍。此外，研究
20 还发现 300 hPa 温度异常对于本次暴雨天气水汽输送具有重要的作用。降水前和降水期间，
21 300 hPa 暖异常中心激发 200 hPa 反气旋式环流异常和经向风正异常中心，同时，在暖异常
22 中心南侧（印度半岛北部）和西侧，激发 500hPa 反气旋式环流异常中心和气旋式环流异常
23 中心，反气旋式环流后部经向风正异常中心将低纬度地区暖湿气流向北输送，与气旋式环流
24 东部偏南气流在暴雨区汇合，为持续性暴雨的发生提供充沛的水汽供应。

25 选取极端干旱的中昆仑山北坡典型暴雨天气事件，通过分析暴雨大尺度水汽输送特征及
26 其与大气环流异常间的关系，为进一步开展中昆仑山北坡暴雨形成机理研究工作提供理论依
27 据，对于提高当地暴雨天气的预报能力，减少因暴雨天气造成的损失具有重要的现实意义。

29 中昆仑山北坡持续性暴雨水汽输送及大气三维结构特 30 征分析

31 刘晶^{1, 2, 3} 周雅蔓⁴ 李建刚^{1, 2, 3} 曾勇^{1, 2, 3} 仝泽鹏^{1, 2, 3} 江雨霏^{1, 2, 3} 杨莲
32 梅^{1, 2, 3, *} 周玉淑^{1, 5, 6}

33 ¹.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002;

34 ².新疆云降水物理与云水资源开发实验室, 新疆 乌鲁木齐, 830002;

35 ³.西天山云降水物理野外科学观测基地, 新疆 乌鲁木齐, 830002

36 ⁴.新疆气象台, 乌鲁木齐, 830002;

37 ⁵.云降水物理与强风暴实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

38 ⁶.中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049)

39 **摘要:** 利用基于拉格朗日方法的 HYSPLIT 轨迹模式, 结合地基 GPS-MET 观测资料, 对 2019
40 年 6 月 24-26 日中昆仑山北坡一次持续性暴雨天气大尺度水汽输送特征及水汽源地进行分析,
41 阐明了干旱区强降水期间大尺度环流异常与水汽持续接力输送过程的关系。结果表明: (1)
42 降水前副热带高压位置异常偏西, 副高外围偏南气流造成高原增湿明显。强降水期间, 副高
43 继续向西北伸展, 低纬度水汽沿印度夏季风环流向北输送, 经青藏高原接力输送至暴雨区,
44 与塔什干低涡前偏南气流共同构成了中昆仑山北坡持续性强降水的水汽输送通道, 水汽持续
45 接力输送造成暴雨区 PWV 出现两次急剧增湿过程, 测站 PWV 峰值达到气候平均值近 2 倍。

46 (2) 300 hPa 温度异常对于本次中昆仑山北坡持续性大暴雨天气水汽输送具有重要的作用。
47 降水前和降水期间, 300 hPa 暖异常中心激发 200 hPa 反气旋式环流异常和经向风正异常中
48 心, 同时, 在暖异常中心南侧(印度半岛北部)和西侧, 激发 500 hPa 反气旋式环流异常中
49 心和气旋式环流异常中心, 反气旋式环流后部经向风正异常中心将低纬度地区暖湿气流向北
50 输送, 与气旋式环流东部偏南气流在暴雨区汇合, 为持续性暴雨的发生提供充沛的水汽供应。

51 **关键词** 中昆仑山北坡; 持续性暴雨; 水汽输送; 大气环流异常

52 **文章编号**

中图分类号: P458.1+21.1

文献标识码 A

53 **doi:**

54 **The characteristic of water vapor transportation and**
55 **three dimensional atmospheric structure during a**
56 **persistent precipitation event in northern slope of**

收稿日期: 2021-06-09

网络预出版日期: 2

资助项目 由新疆气象局引导性项目(YD2023001)、国家自然科学基金项目(U2003106)、天山英才培养计划项目(2022TSYCLJ0003)和新疆维吾尔自治区高层次人才天池计划项目(2019)共同资助

作者简介 刘晶, 女, 1991 年出生, 从事暴雨水汽输送和聚集机理研究, E-mail:994365768@qq.com

通讯作者: 杨莲梅, 从事暴雨诊断和灾害性天气研究。 E-mail:yanglm@idm.cn

57 middle Kunlun Mountains

58 LIU Jing^{1,2,3}, Zhou Yaman⁴, Li Jiangang^{1,2,3}, Zeng Yong^{1,2,3}, Tong Zepeng^{1,2,3}, Jiang Yufei^{1,2,3}, YANG

59 Lianmei^{1,2,3,*}, ZHOU Yushu^{1,5,6}

60 1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

61 2. Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory, Urumqi 830002, China

62 3. Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains, Urumqi 830002, China

63 4. Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China

64 5. Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing
65 100029, China

66 6. School of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

68 ABSTRACT

69 Combined with the ground-based GPS-MET observation data and the HYSPLIT trajectory model based on
70 the Lagrange method, the large-scale water vapour transport characteristics and water vapour source during a
71 persistent heavy rainstorm event on the northern slope of the Middle Kunlun Mountains were analyzed. The
72 relationship between large-scale circulation anomaly and water vapour continuous relay transport during heavy
73 rainfall in arid area were clarified. The result showed: (1) Before the precipitation, the location of the subtropical
74 high was abnormally westward, and the southward airflow on the periphery of the subtropical high caused obvious
75 humidification over the Tibet Plateau. During the heavy rainfall, the subtropical high stretched to the northwest,
76 and the water vapour from low latitude was conveyed to heavy rainfall area along the Indian summer monsoon
77 circulation and Tibet plateau, gather with the south airflow in front of Tashkent low vortex, which constituted the
78 water vapour transport channel for this heavy rainstorm, and resulted two sharply humidification over heavy
79 rainstorm station. The peak PWV of the station is nearly two times of the climatic average. (2) the temperature
80 anomaly at 300 hPa played an important role in the water vapour transport for this heavy rainstorm. Before and
81 during heavy rainstorm, the 300 hPa warm anomaly center excited the 200 hPa anticyclonic circulation anomaly
82 center and meridional wind positive anomaly center. Meanwhile, the 500 hPa anticyclonic circulation anomaly
83 center and cyclonic circulation anomaly center were excited in the south and west of the warm anomaly center
84 (north of the Indian Peninsula). At the back of the anticyclonic circulation at 500 hPa, the warm and wet air was
85 transported northward along the positive windward anomaly center at the low latitude, and converged with the
86 southerly air from the east of the cyclonic circulation in the rainstorm area, providing abundant water vapour
87 supply for the persistent rainstorm.

88 **Key words:** North slope of Middle Kunlun Mountains; Persistent precipitation; Water vapor transport;
89 Atmospheric circulation anomaly

91 引言

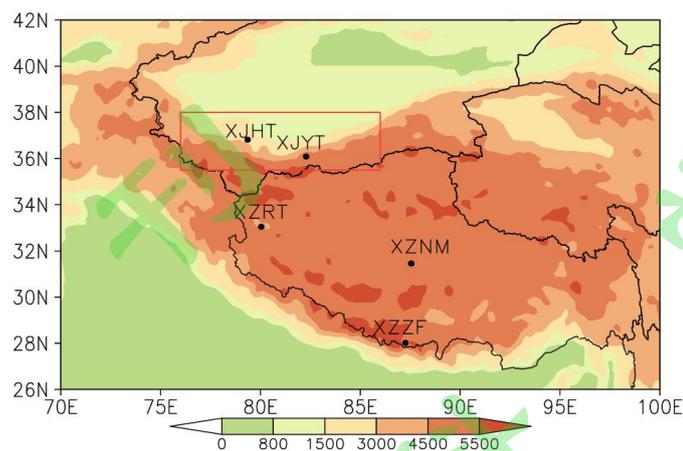
92 强降水的发生与大范围的水汽输送不可分割,而水汽的远距离输送又与大尺度的环流演
93 变(廖晓农等,2013;徐国强和张迎新,1999),尤其是对流层高层环流变化有密切的关系
94 (Sun等,2015)密切相关。针对中国东部季风区降水研究工作相继给出了东部地区暴雨
95 时空分布特征、雨带日变化、季节性变化和次季节尺度特征(YUAN等,2010;LI等,2011;
96 YU等,2004),并提出对流层高层大尺度环流异常提前于强降水的发生时间(SUN等,2015),
97 且持续性大暴雨维持、雨带分布与高空急流、对流层低层气流转向和加强密不可分(全美兰
98 等,2013)。无论是季风区还是干旱区,大气中充沛的水汽和持续的水汽输送都是形成强降
99 水的必要条件。作为东亚季风的重要组成部分,东亚地区水汽输送与东亚地区降水变化间存
100 在密切关系(Park和Schubert,1997;Zhou和Wang,2006;Zhao等,2007),其中中国
101 南海水汽在东亚降水水汽供应中起至关重要的“中转”作用(Ding和Chan,2005;Jin等,
102 2007)。近年来针对季风区暴雨天气水汽输送、聚集机制等方面,国内外研究学者(孙力等,
103 2016;孙建华等,2016;Stohl A和James P,2014;江志红等2011)利用基于拉格朗日方法
104 的轨迹模式(HYSPLIT v4.9),模拟计算了暴雨区几类暴雨的水汽输送轨迹和主要通道,给出
105 了不同源地的水汽贡献(周玉淑等,2015;杨柳等,2018),阐明了季风区夏季暴雨期间水
106 汽输送和聚集机制,为更好的理解季风区暴雨形成机理提供了科学依据。

107 随着全球显著变暖和循环加快,新疆气候由暖干向暖湿转变(施雅风,2003),在“三
108 山夹两盆”复杂地形和天气尺度系统作用下(张家宝,1986;张家宝和邓子风,1987),新
109 疆南、北疆地区降水差异大,尤其南疆地区,受中亚低涡系统影响(张云惠等,2012),降
110 水往往持续时间长,局地小时雨强大,易引发山洪、泥石流等次生灾害,造成重大人员伤亡
111 和经济损失,给当地经济建设和社会发展造成严重灾害(张云惠等,2013,2015;曾勇等,
112 2019;郭楠楠等,2019)。水汽的远距离输送并在南疆上空汇集是南疆暴雨形成的重要原因,
113 以往的研究针对南疆西部暴雨水汽输送和聚集特征开展了大量研究,研究成果表明除影响系
114 统自身携带水汽外,西方、南方和偏东水汽水汽输送也为南疆西部强降水区提供了更充足
115 的水汽源(曾勇和杨莲梅,2017;赵克明等,2017),其中南边界水汽输送是南疆西部暴雨的
116 重要水汽来源,东边界水汽输送是该区域短时强降水的重要补给(张云惠等,2015;努尔比
117 亚·吐尼牙孜等,2019)。中昆仑山北坡与南疆西部相邻,与塔克拉玛干沙漠和青藏高原
118 相接,拥有高山、绿洲和沙漠等复杂下垫面,近年来,在暖湿化气候背景下,中昆仑山北坡
119 地区夏季暴雨频发,有时一场强降水过程产生的降水量远远超过年均降水量(李海花等,

120 2022)。已有的研究均表明，昆仑山北坡持续性强降水的发生与水汽持续性输送密切相关，
121 Yatagai 和 Yasunari (1998)、Huang Wei 等 (2015) 研究发现南疆塔克拉玛干沙漠地区暴
122 雨天气与偏南气流的水汽输送有关，Zhao 等 (2014) 提出中亚地区对流层中、上层温度异
123 常变冷导致近半个世纪以来塔里木盆地降水明显增加，针对中昆仑山北坡暴雨过程水汽来源
124 及输送的研究指出，暴雨天气过程水汽主要源自西南亚、中亚和北疆地区(庄小翠等, 2022)，
125 不同南亚高压分布型造成的水汽输送路径有所差异(李海花等, 2022)，南亚高压为带状分
126 布，水汽输送路径主要为西方和偏东路径，南亚高压双体型，来自阿拉伯海和孟加拉湾的偏
127 南水汽输送量远远大于其他路径。上述针对中昆仑山北坡地区暴雨水汽输送过程研究给出了
128 暴雨水汽输送路径和源地，找出了大尺度环流异常与降水增多的关系，而探究极端强降水天
129 气过程水汽输送路径与大尺度环流关系的研究工作相对匮乏，不同路径水汽如何输送至暴雨
130 区，水汽输送是否存在接力输送过程，为弄清远距离水汽如何输送至中昆仑山北坡地区，本
131 文选取 2019 年 6 月 24 至 6 月 26 日中昆仑山北坡一次持续性降水天气，通过研究强降水天
132 气过程中的大尺度水汽输送、辐合和局地水汽变化特征，结合大尺度环流三维结构分析，探
133 讨强降水发生期间水汽输送及聚集特征，揭示强降水发生期间高、低层大气环流异常对水汽
134 输送的影响及相互作用机制，为更好地理解中昆仑山北坡夏季持续性强降水水汽输送机制及
135 其与大尺度天气系统间关系提供一定参考。

136 1 区域概况

137 中昆仑山北坡位于欧亚大陆腹地，西起乌鲁木齐河（新疆叶城县与皮山县界河），东至安
138 迪尔河（新疆民丰县与且末县界河），北临塔克拉玛干沙漠，南接青藏高原，山区年降水量
139 在 100-200 mm，山前平原区在 50 mm 以下（许有鹏等，1994），是典型的内陆干旱区。由
140 于暖湿气流受阻于天山山脉、帕米尔高原、昆仑山和喀喇昆仑山，中昆仑山北坡低山区及平
141 原地区降水稀少，植被稀疏，但中、高山区可形成较大降水（韩兴胜，2017）。



142
 143 图1 研究区域及地基 GPS 测站分布图 (阴影为地形高度, 红色矩形代表中昆仑山北坡研究区域, XJHT
 144 代表新疆和田站, XJYT 代表新疆于田站, XZRT 代表西藏日土站, XZZF 代表西藏定日站, XZNM 代表西
 145 藏尼玛站)
 146 Fig.1 The distribution of ground-based GPS station at Xinjiang and Xizang province (shaded for the terrain height,
 147 the red rectangle represents the area in North slope of the middle Kunlun mountains, XJHT and XJYT for Hetian and
 148 Yutian station at Xinjiang province, XZRT, XZZF, XZNM for Ritu station, Dingri station, Nima station at
 149 Xizang province).

150 2 资料选取和方法介绍

151 本文利用美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料(水
 152 平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 时间分辨率为 6 h)、NCEP GDAS 资料(作为拉格朗日轨迹模式
 153 HYSPLIT 主要输入资料, 水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 时间分辨率为 6 h)、ECMWF 发布的第一
 154 代(ERA-interim)全球空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、时间分辨率为 6 h 再分析资料和 1979-2019
 155 年 ERA-interim 月平均场再分析资料、中国地面卫星雷达三源融合逐小时降水产品、新疆地
 156 区常规观测、新疆及西藏地区(图 1)共 5 个 GPS 观测大气可降水量(GPS-PWV)资料,
 157 对此次极端强降水天气过程的水汽源地及输送特征进行分析。

158 2.1 水汽流、势函数计算

159 通过求解泊松方程得到水汽通量输送的流函数和势函数及它的旋转(非辐散)分量和非
 160 旋转(辐散)分量(丁一汇, 1989), 针对强降水期间中昆仑山北坡水汽输送和辐合分布特
 161 征, 进而分析该地区强降水期间水汽输送源地。具体求解步骤如下:

- 162 1) 根据格点上的 q, u, v 的值计算得出水汽通量 Q 及其散度和涡度场;
- 163 2) 求解泊松方程, 用超张弛法数值求解 (2) 式得到流函数和势函数;
- 164 3) 由式 (3) 计算得到水汽通量的辐散部分和旋转部分;
- 165 4) 将式 (1) 和式 (2) 垂直积分从而得到单位面积空气柱的势函数和流函数、水汽通量

166 的辐散和非辐散分量。

167
$$Q = \mathbf{k} \times \nabla \psi + (-\nabla \chi) = Q_\psi + Q_\chi, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla^2 \psi = \mathbf{k} \cdot \nabla \times Q_\psi \\ -\nabla^2 \chi = \nabla \cdot Q_\chi \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_\psi = \mathbf{k} \times \nabla \psi \\ Q_\chi = -\nabla \chi \end{cases}, \quad (3)$$

168 其中， Q 为水汽通量， Q_ψ 代表水汽通量流函数， Q_χ 代表水汽通量势函数。

169 **2.2 HYSPLIT 水汽追踪模式**

170 HYSPLIT_4 模式基于拉格朗日方法，是 NOAA 等机构联合开发的一种可处理不同气
171 象数据输入，不同物理过程及不同排放源的包含输送、扩散、沉降过程的模式系统，能够对
172 气块来源进行追溯（Makra L 等，2011；Stohl A 和 James P，2004）。它能通过后向风场轨
173 迹追踪气块，确定气块位置，进而给出水汽源地。另外，通过水汽输送轨迹上气块比湿变化
174 也能反映出降水和蒸发过程(Strong 等，2007；Sjostrom 和 Welker, 2009；Ersek 等，2010)。

175 本次暴雨过程存在持续性的水汽输送，和田地区多站出现极端暴雨，暴雨站集中在
176 81~84° E 一线，海拔高度大多超过 3000 m，因而考虑到地形因素，下文分析以 600 hPa 代
177 表对流层低层，选取 6 月 25 日 08:00（降水最强阶段）作为模拟初始时间，利用 HYSPLIT
178 模式系统追踪气团给出本次强降水过程水汽源地及各源地对水汽输送贡献率。通过分析空间
179 方差增长率（图略）发现，4000 m 轨迹在聚类过程中的方差增长率在聚类结果小于 5 条后
180 迅速增长，因而确定模拟出的轨迹最终聚类为 5 条。

181 同时在 6 月 25 日 08:00（降水最强阶段）模拟水汽主要输送路径（轨迹 1 占水汽输送
182 32%）基础上，对 24 日 14:00 和 08:00 气团位置再次进行后向追踪，进一步证实水汽持续接
183 力输送轨迹，3463 m（24 日 14:00 气团高度）和 3469 m（24 日 08:00 气团高度）轨迹在聚
184 类过程中的方差增长率分别在聚类结果小于 5 条和 4 条后迅速增长，因而确定接力输送点模
185 拟出的轨迹最终聚类为 5 条和 4 条。具体模拟参数见表一。

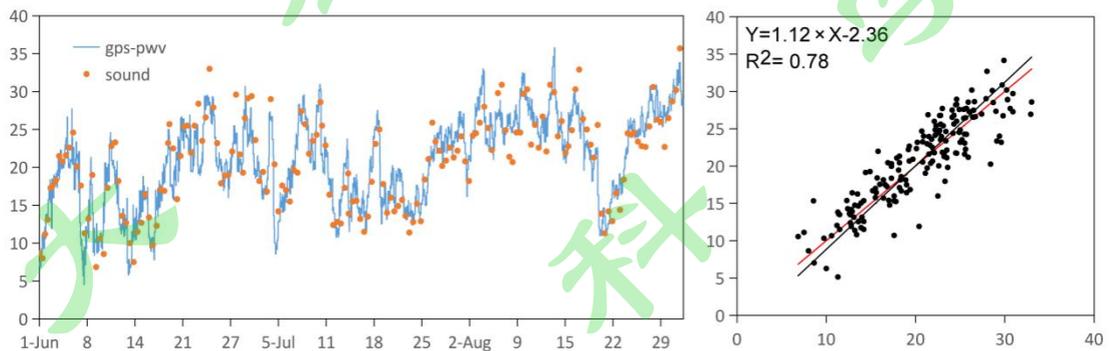
186 表 1 强降水天气过程 HYSPLIT 水汽追踪模式模拟参数表

187 Table 1 The simulation parameters in HYSPLIT_4 mode

模拟参数	和田地区模拟	轨迹 1 水汽接力输送点模拟	轨迹 1 水汽接力输送点模拟
模拟初始位置	36° N, 83°E	32°N, 75°E	32°N, 75°E
模拟初始高度	4000 m	3463 m	3469 m
模拟初始时间	6 月 25 日 08:00	6 月 24 日 14:00	6 月 24 日 08:00
模拟时长	120 h	96 h	96 h
模拟方向	后向	后向	后向
轨迹数	22	18	18

188 2.3 GPS-PWV 数据检验

189 地基 GPS 遥感大气水汽技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种大气观测手段，能够在
 190 各种天气状况下提供连续的高时间分辨率的数据(Wang 等，2007)。整层大气可降水量积分
 191 值能够反映出由于降水、蒸发和水汽辐射导致的水汽收支变化中大气的蒸汽存储量(Fontaine
 192 等，2003)。国内外许多研究(陈娇娜等，2009；曹云昌等，2005；万蓉等，2015；刘晶和
 193 杨莲梅，2017；Tomonori 和 Fujio，2005) 提出大气水汽总量与天气系统和降水过程中水汽
 194 的演变存在密切的关系，并且水汽前期演变对降水的产生具有一定的指示意义。也有研究(赵
 195 玲等，2006) 针对探空观测资料计算的大气可降水量和利用 GAMIT 软件处理反演得到 1 h
 196 间隔的 GPS-PWV 进行检验分析，结果发现两者间误差较小，相关系数高，说明 GPS-PWV
 197 具有较高准确性。通过分析新疆和田站(图 2) 2019 年 6 月-8 月 GPS-PWV 与探空站计算的
 198 可降水量时间变化图发现，GPS-PWV 与探空站计算的可降水量两者间相关性较好，相关系
 199 数达 0.78。这也证实了 GPS-PWV 数据的可靠性，说明 GPS-PWV 数据可作为描述水汽变化
 200 细节的有效手段，补充常规探空资料在时间和空间密度上的不足。



201
 202 图 2 和田站 2019 年 6-8 月 GPS-PWV 和探空计算可降水量 (a) 时间变化和 (b) 散点分布图；图 b 中黑色
 203 实线为 1:1 线，红色实线代表线性回归拟合线。

204 Fig.2 (a) Time serie, and (b) scatter plots of precipitable water vapor (PWV) from Hetian Global Positioning
 205 System (GPS) and sounding station from June 1 to August 31, 2019. The black solid line in (b) is the 1:1 line,
 206 whereas the red solid line is the linear regression fitting line

207 2.4 整层水汽通量计算公式

208 本文整层水汽通量可以写成 (Sun, 2011) :

$$Q_{\lambda} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q u dp \quad (4)$$

209
$$Q_{\phi} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q v dp \quad (5)$$

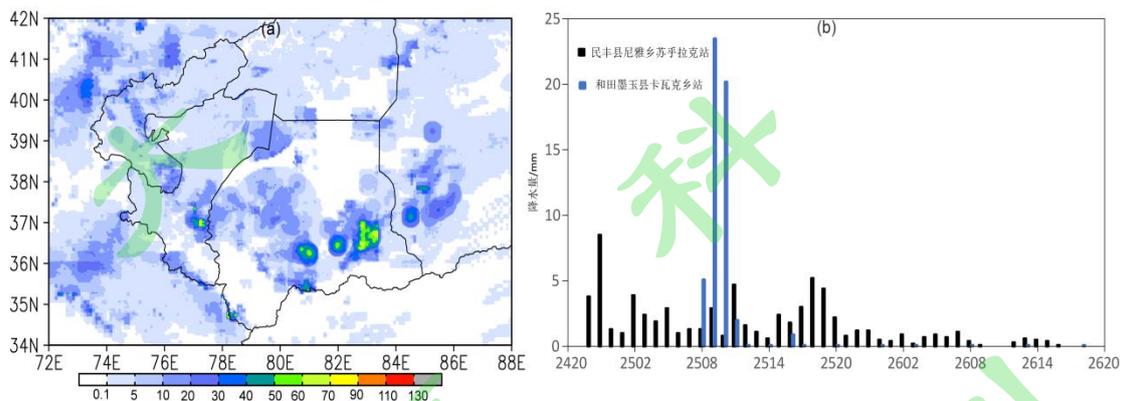
210 其中 Q_{λ} 和 Q_{ϕ} 为整层水汽通量纬向和经向分量， u 为纬向风， v 为经向风， g 是重力加速
 211 度， q 是比湿， p_s 取地面气压， p_t 取 100 hPa。

212 2.5 降水量标准

213 新疆属于干旱、半干旱气候背景，降水级别标准与季风区不同，本文降水级别采用新疆
214 现行的降水业务标准（肖开提，2005）：24 h 降水量 R ， $0.1 \text{ mm} < R \leq 6.0 \text{ mm}$ 为小雨， 6.1
215 $\text{mm} < R \leq 12.0 \text{ mm}$ 为中雨， $12.0 \text{ mm} < R \leq 24.0 \text{ mm}$ 为大雨， $24.0 \text{ mm} < R \leq 48.0 \text{ mm}$ 为暴雨，
216 $R \geq 48.1 \text{ mm}$ 为大暴雨。

217 3 降水基本概况及环流形势分析

218 2019年6月24日-26日，受中纬度低涡系统向东移动影响，新疆中昆仑山北坡一线出
219 现持续性强降水天气，降水时间长，多站出现短时强降水天气（图3a），降水中心民丰县
220 尼雅乡苏乎拉克站（下文简称尼雅乡站）过程降水量达71 mm。降水期间（24日20:00-26
221 日14:00，北京时，下同），低涡位于南疆西部地区，移动缓慢，受低涡前偏南气流影响，
222 对流层低层比湿迅速增大，和田站850 hPa比湿维持在 $10\text{-}12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （图略）。本次中昆仑山
223 北坡一线降水持续42 h，过程累积降水大值区集中在新疆和田地区，其中24日20:00-25日
224 20:00和田地区28个区域气象观测站24 h累积降水量超过24 mm，达到暴雨；和田墨玉县
225 卡瓦克乡站（下文简称卡瓦克乡站）25日08:00-10:00 3 h累积降水量达48.8 mm，小时最大
226 雨强 $23.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ （图3b）。26日20:00后，中昆仑山北坡一线降水逐渐减弱。



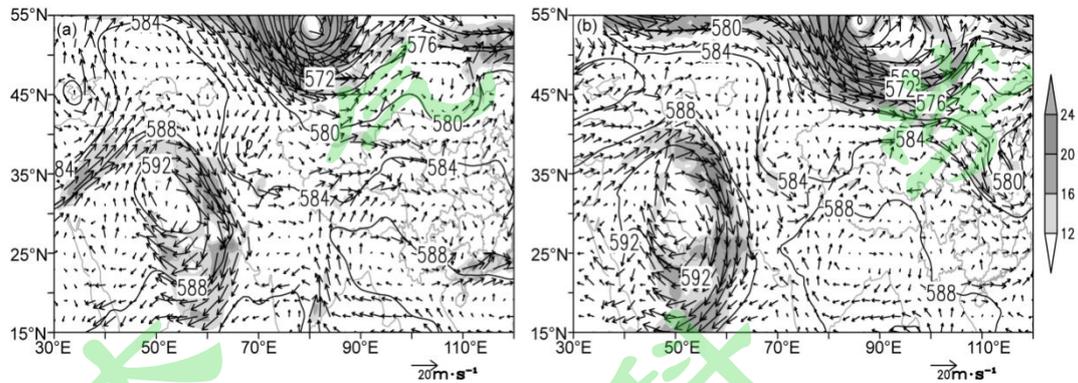
227
228 图3 (a) 2019年6月24日20时-6月26日20时中昆仑山北坡降水实况分布图（单位：mm）

229 (b) 尼雅乡站、阿克肖站和卡瓦克乡站逐小时降水量（单位：mm）

230 Fig.3 (a) The rainfall (units: mm) diagram in North slope of the middle Kunlun mountains during 20:00 BT 24 to
231 20:00 BT 26 June, 2019(units: mm); (b) The variation of hourly precipitation at Niyaxiang, Akexiao, and
232 Kawakexiang station(units: mm).

233 降水前（21日20时，图略）500 hPa 中高纬度欧亚范围内为“两脊两槽”形势，伊朗
234 高压和贝加尔湖高压脊向北发展，两高压脊间形成一低槽，同时低纬度地区西太平洋副热带
235 高压主体位于 20°N 附近，副高呈带状分布，西侧脊点西伸至 95°E 附近，副高西侧偏南气
236 流与低槽前西南气流交汇于青藏高原上空，高原出现增湿过程，500 hPa 西藏定日站比湿由
237 $2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （22日08:00）。23日20:00（图4a），受下游高压脊阻挡，中纬度低

238 槽移动缓慢，并逐渐向东北方向移动，同时西太副高进一步西伸，伊朗高压与乌拉尔山高压
 239 脊同位相叠加，西西伯利亚低涡向南加深，低涡底部锋区分裂波动在塔什干地区形成中亚低
 240 涡，副高西伸至 85°E ，印度半岛副高西侧偏南气流与低涡前西南气流交汇于高原地区，为
 241 高原带来充沛水汽，高原探空站比湿维持在 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；24 日 20 时（图略）中亚低涡系统稳
 242 定少动，低涡分裂波动进入和田地区，同时低纬度副高断裂，在青藏高原南部形成闭合副热
 243 带高压中心，随着伊朗高压向东北发展，低涡进入南疆西部地区（25 日 02:00，图 4b），副
 244 高进一步向北伸展，副高西侧偏南气流与低涡前偏南气流交汇，最大风速达 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。强偏
 245 南气流携带水汽翻越昆仑山，来自低纬度地区暖湿气流经青藏高原后接力输送至暴雨区，为
 246 中昆仑山北坡一线持续性降水天气提供充沛的水汽条件。25 日 08:00-14:00，随着对流层低
 247 层 700 hPa 盆地偏东气流逐渐发展（图略），与中亚低涡前偏西气流辐合，为水汽的局地辐
 248 合抬升提供了有利的动力抬升条件。



249 图 4 23 日 20:00(a) 和 25 日 02:00 (b) 500 hPa 位势高度场(等值线, 单位: dagpm)和风场(矢量, 阴影 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 250 Fig.4 The 500 hPa geopotential(contour, unit: dagpm) and the wind field (vector, shaded for wind speed $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 251 at (a) 20:00 BT 23, June and at (b) 02:00 BT 25, June, 2019.
 252

253 4 强降水期间水汽输送和聚集特征分析

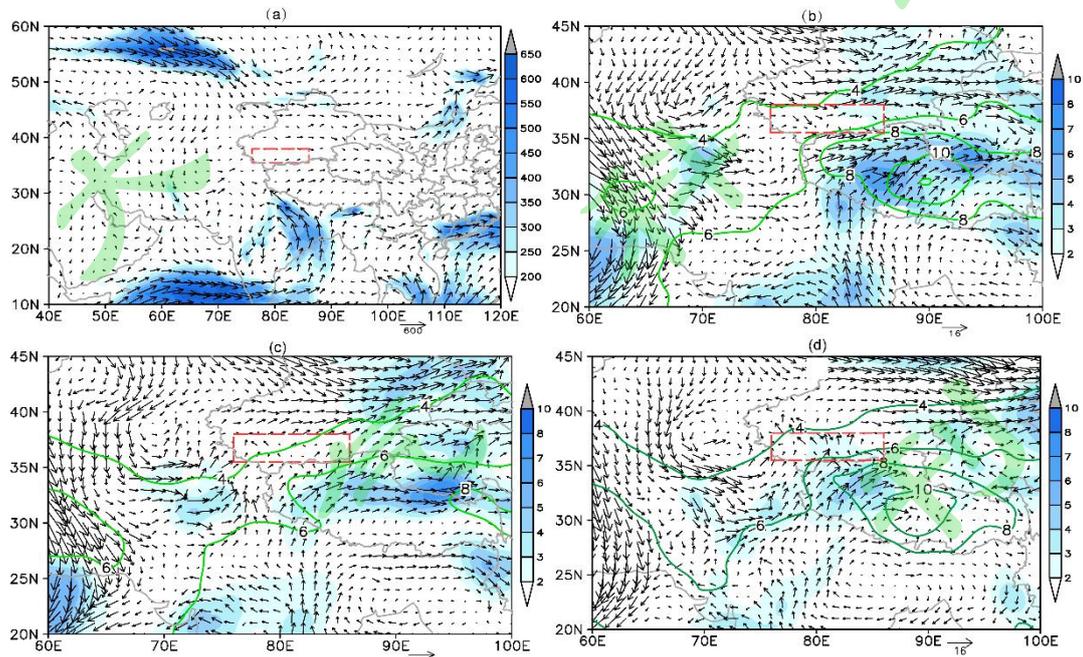
254 本次中昆仑山北坡暴雨集降水时间长，暴雨区集中在和田地区一线，下文通过分析探究
 255 强降水水汽输送和聚集特征，发现降水前暴雨区增湿、降水期间低涡携带水汽和青藏高原水
 256 汽汇集为持续性降水提供了充沛的水汽条件。

257 4.1 大尺度水汽输送特征和局地 GPS-PWV 演变分析

258 6 月 21-23 日，副高西侧偏南气流携带低纬度水汽与中纬度低槽前气流在青藏高原汇合，
 259 23 日 20:00 风云 2G 水汽图像上存在一支完整偏南水汽输送带将低纬度地区水汽向高原输送
 260 （图略），对应高原南侧和西南侧地区最大整层水汽通量分别达 $450\text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ 和 650
 261 $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ （图 5a）， 500 hPa 高原最大水汽通量达 $6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot(\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ （图 5b）。降水前水汽
 262 在高原地区汇集， 500 hPa 青藏高原南部比湿中心达 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （24 日 20:00，图略）。利用

263 西藏地区日土站、定日站、尼玛站 2017-2019 年 6 月 GPS-PWV 数据，计算得到测站 6 月大
 264 气可降水量平均值为 9.1 mm、8.8 mm 和 6.9 mm。从西藏地区 GPS 测站 PWV 距平演变图可
 265 以看出（图 6a），21 日 20:00，中纬度低槽东移进入高原地区，受槽前西南气流影响，定日
 266 站 GPS-PWV 出现一次急剧的增强过程，22 日 15:00 PWV 距平达到峰值(4.9 mm)。22 日
 267 16:00-23 日 20:00，西西伯利亚低涡向南加深过程中不断分裂短波槽东移，同时西太副高位
 268 置异常偏西，副高外围偏南气流与低槽前西南气流交汇于青藏高原，水汽在高原地区快速聚
 269 集，造成定日测站 PWV 距平一直维持在 2 mm 附近。相较定日站，尼玛站位置偏北 2.4°，
 270 因而增湿过程较定日站偏晚。22 日 04:00-23 日 09:00，受中纬度低槽影响，尼玛站出现一次
 271 持续剧烈的增湿过程，PWV 距平由-3.6 mm 持续增至 9.8 mm，PWV 峰值达到平均值的 2 倍，
 272 高原中部地区增湿明显，23 日 10:00-24 日 14:00 尼玛站 PWV 距平值稳定维持在高值附近。

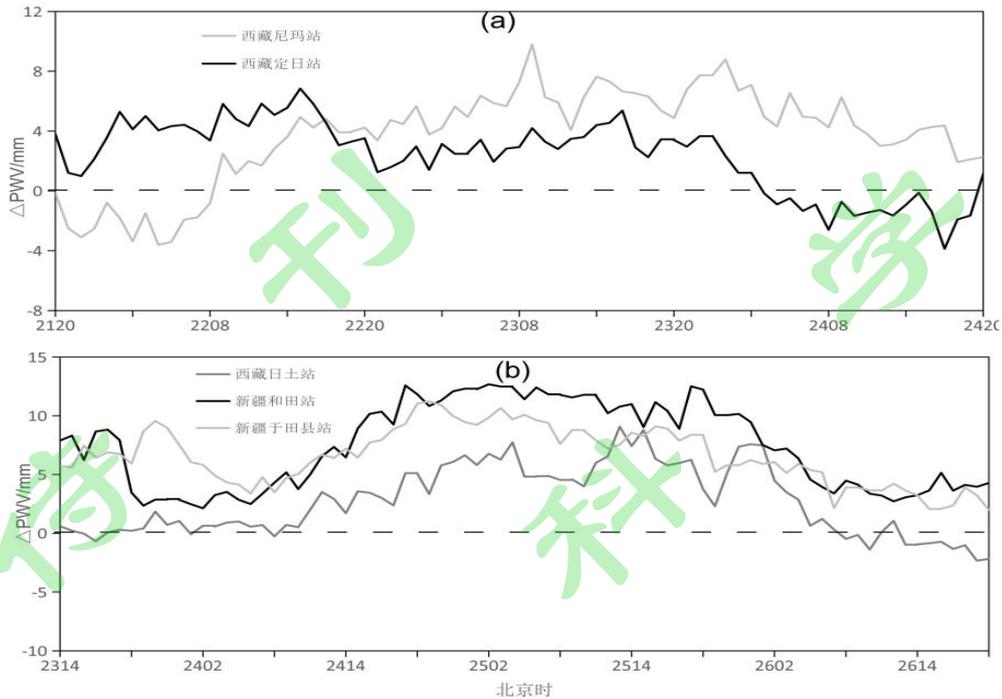
273 上述分析说明强降水发生前，高原地区出现两次增湿过程，中纬度地区低槽东移造成高
 274 原 GPS 测站出现一次快速增湿过程；中纬度短波槽与副高西侧水汽交汇，水汽在高原地区
 275 聚集，一定程度上补充了由于降水造成的大气绝对湿度的下降，高原地区 GPS 测站 PWV
 276 维持在高值附近，受副高和中纬度低槽、短波槽影响，青藏高原自南向北增湿明显。



277
 278 图 5 (a) 23 日 20:00 整层水汽通量 (矢量, 阴影 $\geq 200 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) 分布图, (b) 23 日 20:00、(c) 24 日 08:00
 279 和 (d) 25 日 02:00 500 hPa 水汽通量 (阴影 $\geq 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)、风场 (矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和比湿 (绿
 280 色等值线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分布图
 281 Fig.5 (a) The distribution of integrated water vapor flux (vector, shaded $\geq 200 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ at 20:00 BT on 23 June,
 282 2019. The distribution of 500 hPa water vapor flux (vector, shaded $\geq 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$), wind field (vector, unit:
 283 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and Specific humidity (green contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) at (b) 20:00 BT on 23 June, (c) 08:00 BT on 24 June, and
 284 (d) 02:00 BT 25 on June, 2019.

285 通过计算得到 2017-2019 年昆仑山北坡和田站 PWV 平均值为 16.8 mm。降水前（24 日
286 08:00），西西伯利亚低涡底部锋区分裂波动并在塔什干地区形成中亚低涡，同时低纬度副
287 高西伸至 85°E，副高西侧偏南气流在向北输送水汽过程中与低涡前西南气流交汇，造成 24
288 日 08:00 和田站（和田地区西部）和西藏西北部地区日土站 PWV 出现快速持续的增湿过程，
289 24 日 08:00-25 日 02:00（图 5c、图 5d），随着副高进一步向北伸展至高原地区，500 hPa 低
290 纬度水汽经高原地区继续向北输送至暴雨区，25 日 02:00 高原西部偏南气流明显增强，最大
291 风速达 14 m·s⁻¹，中亚低涡前西南气流与副高外围偏南气流交汇于中昆仑山北坡，暴雨区受
292 高原北侧湿舌影响，自西向东增湿明显，比湿维持在 6 g·kg⁻¹。和田站和高原北部日土站 25
293 日 02:00 和 04:00 PWV 距平值（ Δ PWV）先后达 12.7 mm 和 7.7 mm（图 6b）；25 日 08:00
294 中亚低涡向东移并开始影响中昆仑山北坡一带，受中亚低涡前偏南气流影响，和田站 PWV
295 距平稳定维持在 12 mm 附近，暴雨区增湿明显，同时低纬度地区副高由高原中部向南移至
296 高原南侧，日土站 PWV 距平略有下降。25 日 14:00，副高进一步西伸至 75°E 附近，副高西
297 侧偏南气流经青藏高原向北输送水汽，与低涡前西南气流交汇于中昆仑山北坡，造成西藏日
298 土站 PWV 距平迅速增至 9.1 mm，同时 25 日 14:00-20:00 和田站和于田站 PWV 距平也再次
299 出现波动增长过程，和田站和于田站 PWV 峰值分别达到气候平均值 1.7 倍和 1.9 倍。

300 降水前副高位置异常偏西，副高外围偏南气流造成高原增湿明显，高原前期聚集的水汽
301 为中昆仑山北坡持续性暴雨提供源源不断的水汽供应。暴雨期间副高西伸至 80°E 以西，并
302 继续向北伸展，高原西部偏南气流与中纬度中亚低涡前西南气流汇集于暴雨区，中昆仑山北
303 坡一线增湿明显，两支偏南气流的交汇为暴雨区带来充沛的水汽，低纬度水汽的补充一定程
304 度上平衡了由于降水造成的中低层大气绝对湿度下降，因而中昆仑山北坡一线地区整层大气
305 可降水量异常偏高。



306
 307 图6 (a) 2019年6月21日-24日青藏高原中南部地区尼玛站和定日站、(b) 2019年6月23日-26日青
 308 藏高原西北部地区日土站和中昆仑山北坡和田站、于田站 PWV 距平(等值线, 单位: mm) 逐时演变曲线
 309 Fig.6 (a) The PWV anomaly (contour, Unit: mm) evolution of Nima and Dingri stations at middle-southern
 310 Tibetan plateau during 21 to 24 June,2019, (b) of Ritu station at northern Tibetan plateau, of Hetian station and
 311 Yutian station at northern slope of middle Kunlun mountains Mountain during 23 to 26 June, 2019.

312 **4.2 水汽源地和水汽输送轨迹分析**

313 从降水前水汽流函数无辐散分量分布图上(图7a)可以看出, 23日20:00受副高西伸
 314 影响, 水汽流函数的整层分布在青藏高原西南侧存在大值中心, 低纬度地区充沛的水汽沿副
 315 高外围偏南气流向青藏高原输送, 造成高原南部和中部地区持续增湿。24日08:00-14:00(图
 316 略), 水汽流函数整层分布大值中心移至高原南部, 强度增至 $300 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。副高向北伸
 317 展至高原中部, 副高外围水汽经青藏高原持续向中昆仑山北坡地区输送, 低纬度充沛的水汽
 318 输送造成暴雨区增湿明显。降水期间(25日02:00, 图7b)高原南部水汽流函数整层分布大
 319 值中心增至 $350 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 副高外围偏南气流经青藏高原与中亚低涡前西南气流共同汇集
 320 在暴雨区上空, 构成本次强降水天气的水汽输送通道。从整层水汽势函数及辐散分量分布图
 321 上可以看出(图略), 在强降水期间, 中昆仑山北坡一线处于水汽势函数低值区, 即水汽辐
 322 合区。本次中昆仑山北坡强降水水汽输送分布形势与新疆伊犁河谷暴雨时期分布(刘晶等,
 323 2019)有所不同, 伊犁河谷降水期间大西洋水汽经黑海、里海和咸海向东的水汽输送通道更
 324 为明显, 与低纬度偏南水汽输送在河谷地区汇集, 造成强降水天气, 而中昆仑山北坡一线地
 325 区强降水期间, 水汽主要为低纬度地区水汽经青藏高原向北接力输送, 与中亚低涡携带的水
 326 汽共同影响暴雨区, 暴雨区降水前持续增湿, 充沛的水汽供应也使得降水时间较长。

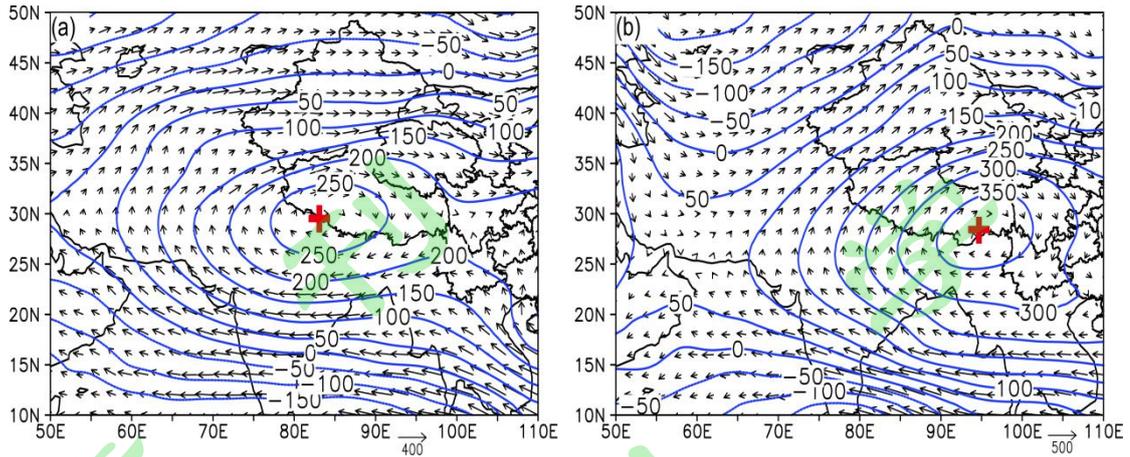


图7 (a) 2019年6月23日20:00和(b)6月25日02:00整层水汽流函数(等值线,单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)及非辐散分量(矢量),+代表水汽流函数大值中心

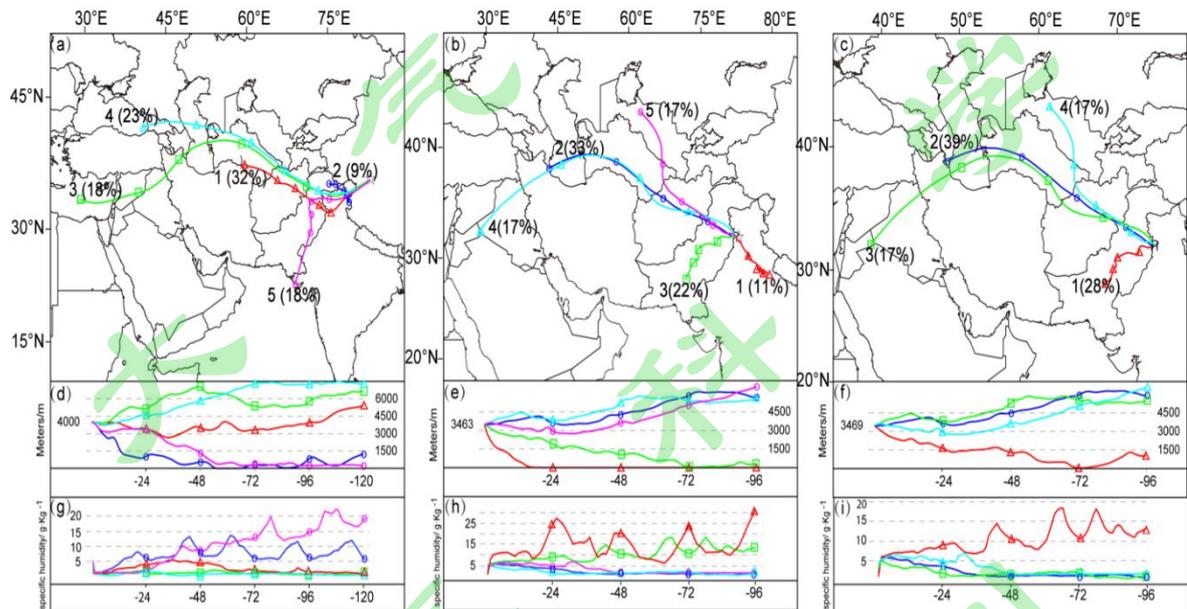
Fig.7 The distribution of integrated stream function (contour, unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) and non-divergent component mode(vector) of the water vapor transport at 20:00 BT 23 and at 02:00 BT 25, June,2019. + for center of water vapor stream function

为进一步证实本次强降水水汽源地及水汽输送特征,利用 HYSPLIT 模式模拟得到了强降水期间水汽输送轨迹。由图 8a 可以看出 4000 m 和田地区共出现 5 条水汽输送轨迹,通道 1 偏西水汽输送占 4000 m 水汽输送总量的 32%。气块自阿姆河 5000 m 高度向东南方向输送,24 日 08:00 气块到达巴基斯坦东部 (32°N , 75°E),高度下降至 3500 m (图 8d),随后沿中亚低涡前偏南气流向西北方向移动,在翻越昆仑山过程中,受槽前上升运动和地形爬坡抬升影响,气块逐渐抬升至 4000 m 附近。通道 2 占 4000 m 水汽输送总量的 9%,水汽自巴基斯坦东北部近地面向东南方向输送,随后沿低涡前偏南气流逐渐抬升至 3000 m 附近,在地形强迫抬升下,气块翻越昆仑山进入暴雨区。通道 3 和通道 4 为偏西水汽输送,共占 4000 m 水汽输送总量的 41%。黑海东部 7000 m 左右高度水汽向东输送,经里、咸海后沿东北方向向暴雨区输送,高度逐渐下降至 4000 m;通道 5 水汽自阿拉伯海沿副高外围偏南气流向北输送至巴基斯坦北部,气块随后沿低涡底部偏西气流进入暴雨区,最大比湿达 $22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 8g),这支偏南水汽输送通道携带副热带地区暖湿气流进入中昆仑山北坡一线,造成强降水天气,此通道占 4000 m 水汽输送总量的 18%,可以看出来自低纬度地区的气流携带的暖湿不稳定能量在中昆仑山北坡地区有效释放对暴雨的发生具有不可忽视的作用,这与已有研究结论较为一致(林振耀和吴祥定,1990;Yatagai 和 Yasunari,1998)。

由图 7b 发现 24 日 08:00-14:00 和 14:00-20:00,暴雨区测站出现两次快速增湿过程,为弄清 24 日 08:00-14:00 暴雨区 PWV 跃升与水汽输送关系,因而在 6 月 25 日 08:00 (降水最强阶段)模拟水汽主要输送路径(轨迹 1 占水汽输送 32%)基础上,对 24 日 14:00 和 08:00 气团位置再次进行后向追踪,探讨两次水汽接力增湿过程(图 8b、c)与暴雨区 PWV 跃升

352 关系。分析发现，24日08:00，3500 m 高度巴基斯坦东部地区水汽主要源自偏西水汽输送
 353 轨迹（轨迹1和轨迹2）和偏南水汽输送轨迹（轨迹3），充沛水汽在巴基斯坦东部地区水
 354 汽聚集，随后沿中亚低涡向东继续输送，因而造成暴雨区测站PWV 24日08:00-14:00一次
 355 快速增长过程。24日14:00 3000 m 高度除了偏西水汽输送（轨迹2、3和轨迹5）和偏南水
 356 汽输送轨迹（轨迹4）外，前期在青藏高原南侧聚集的充沛水汽沿高原南侧向西北方向输送
 357 （轨迹1），与偏西和偏南水汽输送轨迹汇集于巴基斯坦东部地区，随后继续沿中亚低涡前
 358 偏南气流进入暴雨区，造成暴雨区测站24日14:00-20:00 PWV 出现急剧增湿过程。

359 综合以上分析可以看出，降水前存在低纬度偏南、高原南侧偏东和中纬度偏西水汽接力
 360 输送过程，造成暴雨区PWV 出现两次急剧增湿过程。强降水期间对流层低层（600 hPa 附
 361 近）暴雨区水汽输送主要来自偏西路径和偏南路径，与上文得出偏南水汽接力输送和中纬度
 362 偏西水汽输送通道结论一致。



363 图8 4000 m(左)、3463 m(中)和3469 m(右)水汽输送通道空间分布(a-c)、高度(d-f, 单位: m)和比
 364 湿(g-i, 单位: $g \cdot kg^{-1}$)变化, (a)中☆为和田地区代表点(36°N, 83°E), (b)和(c)中☆点经纬度为
 365 (32°N, 75°E)
 366

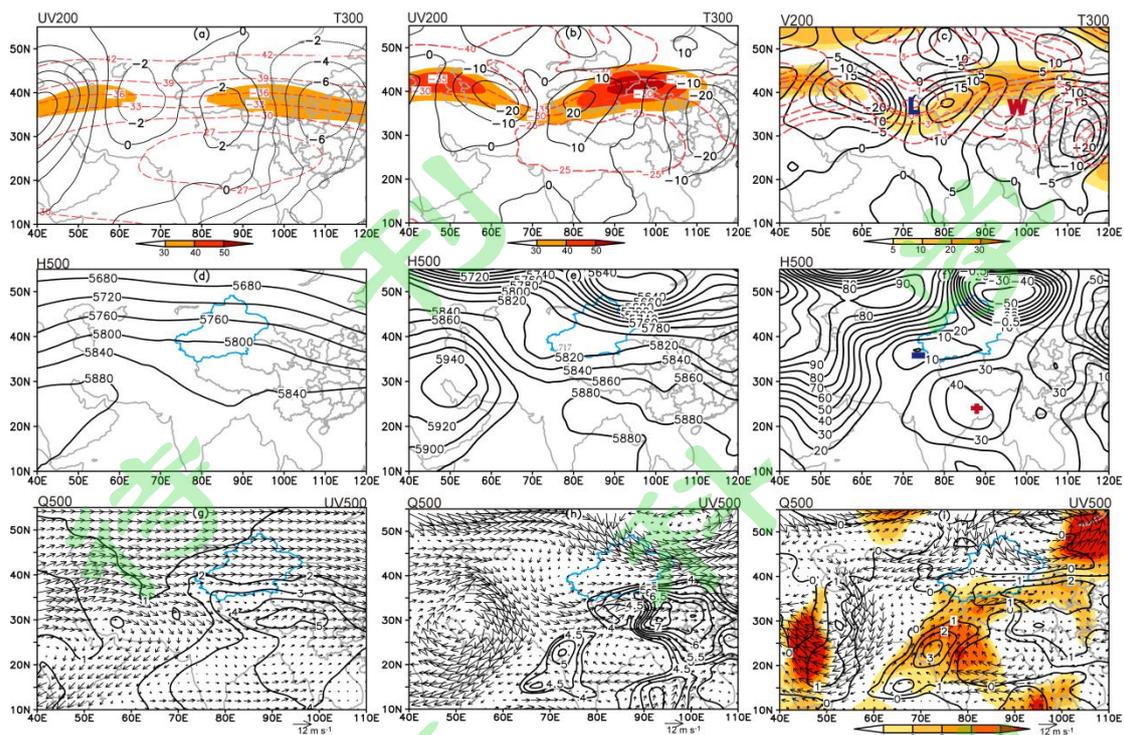
367 Fig.8 The water vapor transport channel spatial distribution (a-c), the variation of height (d-f, unit: m) and specific
 368 humidity (g-i, unit: $g \cdot kg^{-1}$) at 4000 m (left), 3463 m (middle), and 3469 m (right); ☆ for representative site
 369 (36°N,83°E) over Hetian area in (a), ☆ for site (32°N,75°E, 3463m) in (b) and site (32°N,75°E, 3469 m) in (c).

370 5 强降水期间暴雨区大气环流异常分析

371 本次强降水天气存在持续性的水汽输送,为暴雨区提供了充沛的水汽条件。持续性的水
 372 汽输送离不开大尺度环流配置,而温度场又是联系高、低层大气环流场的重要因子(Yu等,
 373 2004; Zhao等, 2015)。图9给出的是1979-2019年6月气候平均场、暴雨日环流场及环

374 流异常场的分布情况。可以看出 300 hPa 6 月气候平均场上，平直温度带控制中纬度地区上
375 空（图 9a），而在暴雨日环流场（图 9b）上，青藏高原-河西走廊一线出现暖脊，中昆仑山
376 北坡沿线均处于暖脊控制下，因而造成青藏高原-中昆仑山北坡-河西走廊地区暖异常现象
377 （图 9c），最强暖中心 5℃。在静力平衡下，暖异常附近空气产生上升运动，并在暖异常上
378 层堆积，造成暖异常上层高度场有所上升并形成反气旋式环流异常中心（图略），在气压梯
379 度力和地转偏向力共同作用下，200 hPa 反气旋式环流异常中心西侧和北侧出现经向气流和
380 纬向气流正异常中心（图 9c），最大经向气流正异常达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比图 9a、b 发现，强降
381 水期间暴雨区上空出现高空西南急流，急流核呈东北-西南走向，暴雨区（ 36.5° E ， 79°
382 $\text{E} \sim 83^\circ \text{ E}$ 附近）和高原西侧处于高空急流入口区左侧和急流核控制下，高层强烈的辐散（林
383 爱兰等，2015）利于局地对流的发生发展。

384 在静力平衡和地转平衡控制下，对流层高层暖异常空气产生上升运动，逐渐造成暖异常
385 周边和下层空气质量亏损，在气压梯度力作用下，暖异常西侧 500 hPa 形成弱气旋式环流异
386 常，暖异常中心南侧 500 hPa 形成反气旋式环流异常（图 9f）。中纬度地区西太副高位置异
387 常偏西（图 9e），在印度半岛北部形成 40 gpm 的强反气旋式环流异常中心，强反气旋式环
388 流异常和气旋式环流异常中心形成南北对峙，暴雨区处于气旋式环流异常前侧西南气流控制。
389 印度半岛北部反气旋式环流异常西侧的偏南气流正异常与西太平洋副热带高压西伸有关，沿
390 副高外围的偏南气流在高原西侧转向（图 9h），将副热带地区暖湿气流持续向北输送（图
391 9i），经青藏高原西南侧后补充至气旋式环流异常中心。另外值得注意的是，6 月比湿气候
392 平均场上（图 9g）中昆仑山北坡-青藏高原存在明显的湿舌，而强降水期间除了高原向西北
393 方向伸展的湿舌外，印度半岛西侧也存在向北伸展的湿舌，这也说明在干旱、半干旱地区，
394 强降水的发生与水汽持续输送和补充密切相关。



395

396 图9 8月气候平均环流场、暴雨日(24日20:00-26日20:00)平均环流场及环流异常场

397 (a)、(d)、(g)代表气候平均环流场,(b)、(e)、(h)代表暴雨日环流场,(c)、(f)、(i)代表环流异常场,蓝色地

398 图图为新疆省。从上至下图形中黑色等值线分别代表200 hPa 经向等风速线(单位: $m \cdot s^{-1}$)、500 hPa 位势高

399 度场(单位: gpm)和500 hPa 等比湿线(单位: $g \cdot kg^{-1}$),图(a)-(c)中红色等值线代表300 hPa 等温度线(单

400 位: $^{\circ}C$), (a)-(b)阴影代表200hPa 经向风速 $\geq 30 m \cdot s^{-1}$,图(c)阴影代表200hPa 经向异常风速 $\geq 5 m \cdot s^{-1}$,图(g)-(i)

401 矢量代表500 hPa 风场(单位: $m \cdot s^{-1}$),图(i)阴影代表500 hPa 经向异常风速 $\geq 1 m \cdot s^{-1}$ 。

402 Fig.9 the circulation characteristics(contour and vector) of (a),(d),(g) climatology in August; (b),(e),(h) heavy

403 rainfall days; (c),(f),(i) anomaly field. the black contours from(top) to (bottom) indicate 200 hPa zonal wind($m \cdot s^{-1}$),

404 500 hPa geopotential height(gpm) and 500 hPa specific humidity($g \cdot kg^{-1}$), the red contour of (a)-(c) denote the

405 300hPa temperature($^{\circ}C$), the shaded for meridional wind speed at 200 hPa $\geq 30 m \cdot s^{-1}$ in (a)-(b), for meridional

406 anomaly wind speed at 200 hPa $\geq 5 m \cdot s^{-1}$ in (c), and for meridional anomaly wind speed at 500 hPa $\geq 1 m \cdot s^{-1}$ in (i),

407 the vectors in (g)-(i) were presented 500hPa wind field($m \cdot s^{-1}$)

408 从强降水期间沿 $75^{\circ} E$ 经向-垂直环流异常剖面图上(图 10a)可以看出,青藏高原西

409 侧 300 hPa 附近温度正异常中心以南对流层中层和对流层高层均出现经向风正异常大值区,

410 且 200 hPa 高度上经向风正异常中心达 $12 m \cdot s^{-1}$,在这种环流形势下利于垂直经圈环流的增

411 强, $20^{\circ}N \sim 24^{\circ}N$ 地区和 $37^{\circ}N \sim 41^{\circ}N$ 地区出现经向垂直环流圈,低纬度地区上升运动将暖

412 湿水汽携带至对流层中层,在经向风正异常的输送下,副热带地区充沛水汽向北输送至塔什

413 干地区气旋式环流中,一定程度补充了气旋式环流异常中心的水汽,并继续沿气旋式环流异

414 常前侧偏南气流进入暴雨区。结合纬向-垂直环流异常剖面图的分析发现(图 10b),强降

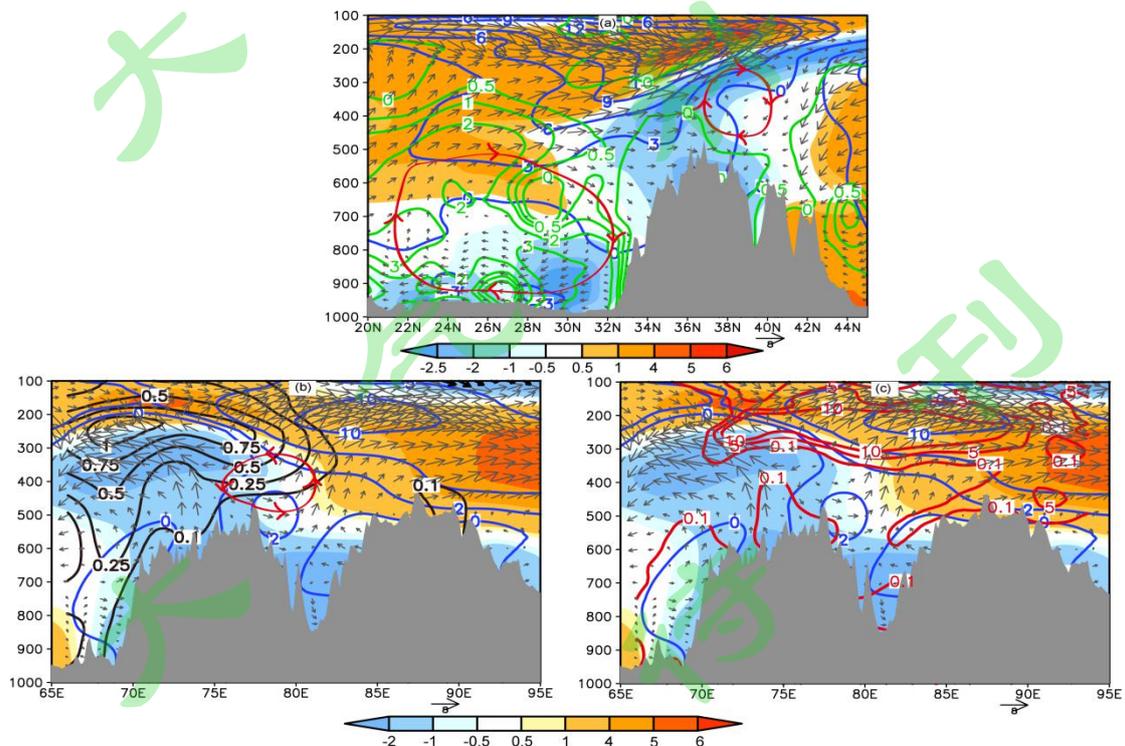
415 水期间 300 hPa 暖异常中心造成高层反气旋式环流异常,暴雨区位于高层反气旋式环流异常

416 西侧高空西南急流控制,在这种环流形势下大气高、低层间的垂直风切变增强,强烈高空辐

417 散抽吸利于暴雨区垂直运动的发展,暴雨区处于纬向垂直环流圈上升支。另外在暴雨区(79°

418 E~83° E) 上空涡度平流随高度增加 (图 10b), 最大正涡度平流中心位于 300 hPa 附近,
 419 同时暴雨区 400 hPa 以上均为暖平流 (图 10c), 根据 Ω 垂直运动方程可知, 在暖平流和涡
 420 度平流随高度增加的情况下, 上升运动将有所加强。600 hPa 附近横向垂直正环流圈维持,
 421 暖气团上升, 冷气团下沉, 冷暖气团交绥, 利于局地对流系统的发生发展, 暖湿气团不断被
 422 抬升, 斜压有效位能向动能转化, 也利于垂直运动的发展。以上分析表明暴雨期间的环流特
 423 征有利于暴雨区水汽持续输送和对流系统的发展。

424 综合上述分析发现, 在静力平衡和地转平衡下, 300 hPa 暖异常中心激发对流层高层 200
 425 hPa 反气旋式环流异常, 高层在反气旋式环流西侧为经向正异常风大值中心, 暴雨区处于强
 426 西南气流入口区辐散场控制, 同时, 在暖异常中心南侧 500 hPa 印度半岛形成反气旋式环流
 427 异常中心, 反气旋式环流西部经向风正异常中心将低纬度地区暖湿气流向北输送, 与气旋式
 428 环流东部偏南气流汇合, 一定程度上补充了气旋式环流携带的水汽。高、低层环流异常分别
 429 造成高层强烈的辐散和高层反气旋式环流西部经向风正异常、弱气旋式环流南侧纬向风正异
 430 常, 一方面与地形、高空辐散场相互配合形成纬向垂直环流圈, 暴雨区上升运动增强, 另一
 431 方面为暴雨区提供暖湿水汽, 造成局地的大暴雨天气。而对流层高、低层高度场上的环流异
 432 常又与 300 hPa 暖异常有关, 因而可以说明, 300 hPa 温度异常对于本次中昆仑山北坡持续
 433 性大暴雨天气具有重要的作用。



434
 435 图 10 暴雨期间 (24 日 20:00-26 日 20:00 环流平均场) 沿 75° E 纬向-垂直剖面图和沿 36.5° N 经向-垂直剖
 436 面图

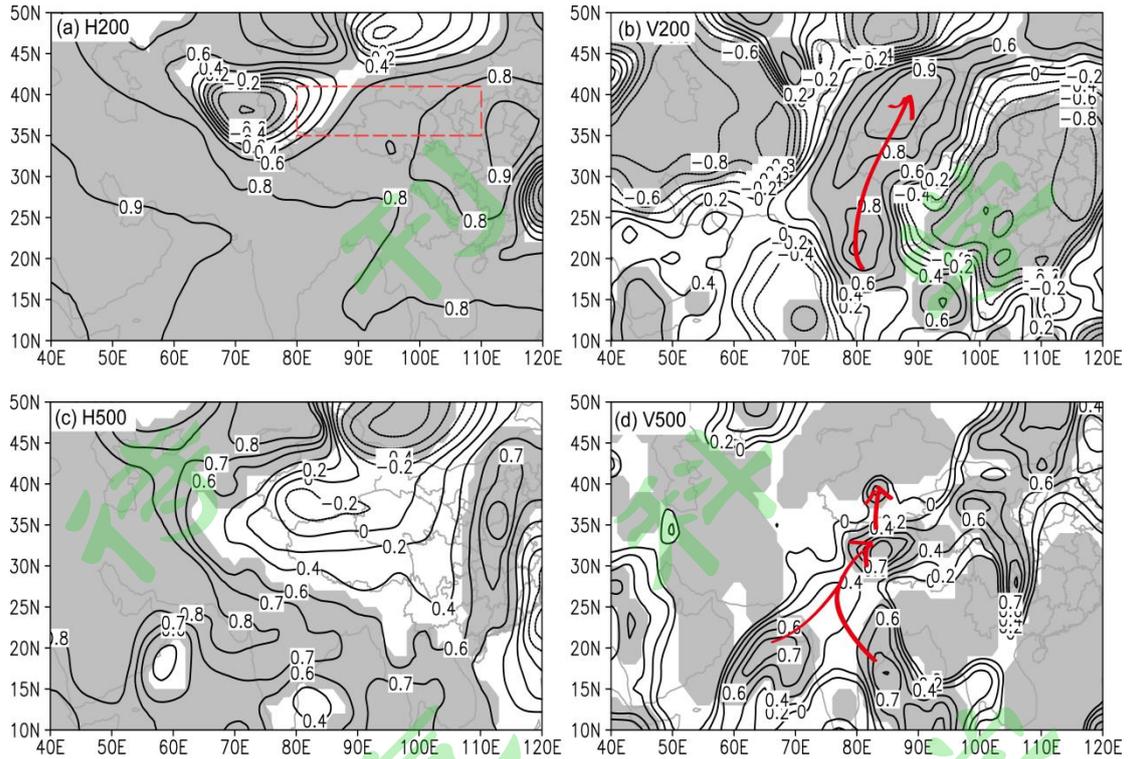
- 437 (a) 沿 75°E 纬向垂直剖面图, 矢量为经向风和垂直速度异常合成(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 垂直速度扩大 2 倍), 绿色
438 代表比湿异常场(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 蓝色线代表经向风异常(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
439 (b) 沿 36.5°N 经向垂直剖面图, 矢量为纬向风和垂直速度异常合成(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 垂直速度扩大 2 倍), 黑
440 色线代表暴雨期间正涡度平流(单位: 10^{-10}s^{-2}), 蓝色线代表纬向风异常(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
441 (c) 沿 36.5°N 经向垂直剖面图, 矢量为纬向风和垂直速度异常合成(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 垂直速度扩大 2 倍), 红
442 色线代表暴雨期间暖平流 (单位: $10^{-5}\text{K}\cdot\text{s}^{-2}$), 蓝色线代表纬向风异常(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
443 (a)-(c)图形下部灰色阴影代表地形, 彩色阴影代表温度异常(单位: K);

444 Fig.10 (a)the zonal-vertical section (along 75°E), the vector for the composite of meridional-vertical anomaly
445 wind(unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,and the vertical winds were amplified 2 times); (b) the meridional-vertical section(along
446 36.5°N),the black line for the positive vorticity advection(unit: 10^{-10}s^{-2}); (c) the meridional-vertical section(along
447 36.5°N),the red line for the positive warm advection(unit: $10^{-5}\text{K}\cdot\text{s}^{-2}$). The grey shaded for the terrain and the color
448 shaded for the temper anomaly (unit: K) in (a)-(c); the blue for meridional wind anomaly in (a), and for zonal wind
449 anomaly in (b)-(c).

450 4.2 大气上层温度异常与三维环流结构间的联系

451 为了证实 300 hPa 暖异常与其他各物理量场异常间的关系, 通过对 300 hPa 暖异常与其
452 他各物理量场异常相关性的分析发现(图 11), 在强降水发生前 3 天, 暴雨区及其下游地
453 区上空 300 hPa 已出现暖异常(图略), 且 300 hPa 暖异常与滞后 3 天的 200 hPa 高度场异
454 常、经向风异常、500 hPa 经向风异常、500 hPa 高度场异常均有较好的相关性。

455 降水前和降水期间, 暴雨区及其以东地区上空 300 hPa 均为暖异常控制, 由图 11a 可以
456 看出, 降水期间暴雨区 200 hPa 高度场与降水发生前 3 天 300 hPa 温度场存在明显的正相关
457 关系, 最大正相关系数超过 0.9, 且相关系数通过 95%的显著性检验, 再次论证了当 300 hPa
458 出现暖异常后, 上层高度场出现明显抬升, 反气旋式环流异常的出现加强了高空南风急流异
459 常(图 11b), 利于高空辐散场的形成, 暴雨区位于 200 hPa 经向风正异常区控制。另外高
460 空暖异常形成后, 对应 500 hPa 暖异常西侧出现弱气旋式环流异常场(图 11c, 与塔什干低
461 值系统有关), 负异常中心位于 78°E~92°E 地区, 暖异常南侧出现反气旋式环流异常场, 在
462 反气旋式环流异常后部经向风异常与强降水前 300 hPa 暖异常存在正相关关系(图 11d),
463 最大相关系数达 0.7, 且通过 95%的显著性检验, 强的偏南气流将低纬度地区洋面水汽持续
464 向北输送至高原地区及气旋式环流异常中心, 为强降水的发生提供了充沛的水汽。中纬度弱
465 气旋式环流前侧经向风正异常再次将水汽向北输送至暴雨区, 形成水汽接力输送通道, 以上
466 分析说明了强降水期间位势高度场、高、低空经向气流异常与降水发生前高空暖异常的存在
467 紧密相连, 也反映出降水期间水汽的输送与高空暖异常存在一定联系。



468

469 图 11 降水前 3 天 (21-23 日) 暴雨区及其下游地区 (35°N-41°N, 80°E-110°E, 红色矩形框) 300hPa 平
 470 均温度异常场与暴雨期间 (24-26 日) (a) 200hPa 高度、(b) 200 hPa 经向风、(c) 500 hPa 高度场、(d)
 471 500 hPa 经向风异常场相关系数空间分布, 图中阴影代表通过 95% 检验区

472 Fig.11 The spatial distributions of the correlation coefficients between 300 hPa temper anomaly at heavy rainfall
 473 area and its downstream region on three days before the heavy rainfall occurred (from 21 to 23, June) and the
 474 200hPa geopotential height (a), meridional zonal wind (b), 500 hPa geopotential height (c) and meridional wind
 475 anomaly field (d) during the heavy rainfall period (from 24 to 26, June), the shaded passed the 95% significance
 476 test.

477 4.3 强降水期间大气环流结构模型

478 通过上述分析后给出本次中昆仑山北坡暴雨环流结构模型 (图 12), 主要成员有: 300
 479 hPa 温度暖异常, 200 hPa 反气旋异常 (高空急流), 500 hPa 气旋式环流和反气旋式环流异
 480 常 (中空急流) 和比湿异常区。高层 300 hPa 温度暖异常, 激发 200 hPa 反气旋式环流异常,
 481 高空急流增强, 在地转平衡和静力平衡控制下, 高层辐散, 促使垂直运动发展。同时高层
 482 300 hPa 在温度暖异常西侧和南侧, 分别激发 500 hPa 气旋式环流异常和反气旋式环流异常,
 483 反气旋式环流异常后部经向风正异常将低纬度地区暖湿水汽持续向北输送至高原地区和塔
 484 什干地区气旋式环流中, 在气旋式环流异常前侧偏南气流输送下, 水汽接力输送至暴雨区,
 485 进而为中昆仑山北坡持续性暴雨的发生提供源源不断的水汽供应。

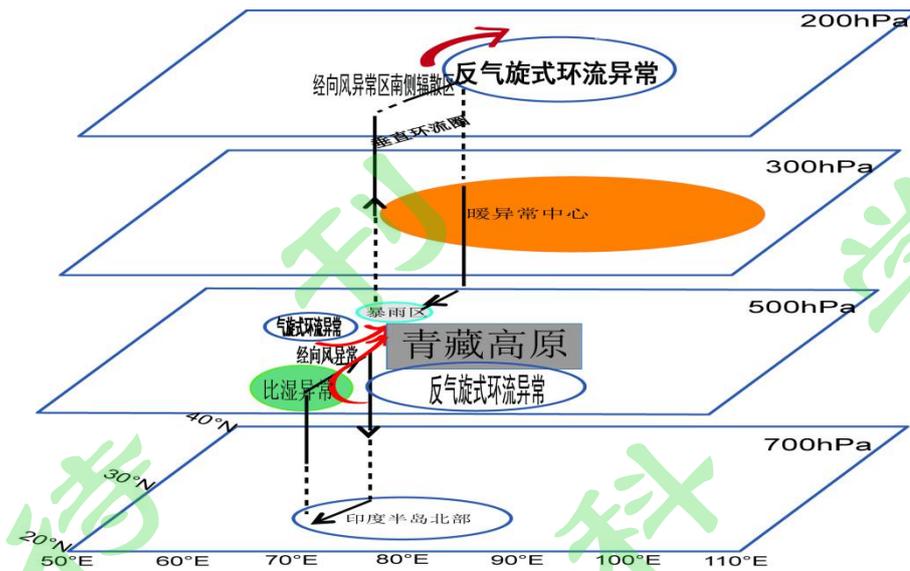


图 12 中昆仑山北坡持续性暴雨事件大气环流结构模型

Fig.12 The structure of atmospheric circulation model during extreme rainstorm event at north slope of middle Kunlun Mountains

6 结论与讨论

通过对中昆仑山北坡 2019 年 6 月 24 日-26 日一次持续性暴雨天气水汽输送、水汽追踪及大气三维结构特征的分析, 阐明了强降水水汽输送源地和水汽输送特征, 探讨了此次强降水水汽持续输送与大尺度环流间的关系, 并得到以下结论:

(1) 降水前西太副高位置异常偏西, 副高外围偏南气流造成高原增湿明显。强降水期间, 西太副高西伸至 80°E 以西, 并继续向北伸展, 低纬度水汽沿印度夏季风环流向北输送, 经青藏高原接力输送至暴雨区, 与塔什干低涡前偏南气流共同构成了中昆仑山北坡持续性强降水的水汽输送通道。

(2) 强降水期间在 4000 m 高度暴雨区水汽输送主要来自中纬度偏西和低纬度偏南水汽输送, 水汽持续接力输送造成暴雨区 PWV 出现两次急剧增湿过程, 测站 PWV 峰值达到气候平均值近 2 倍。

(3) 300 hPa 温度异常对于本次中昆仑山北坡持续性大暴雨天气水汽输送具有重要的作用。降水前和降水期间, 在静力平衡和地转平衡控制下, 300 hPa 暖异常中心激发对流层高层 200 hPa 反气旋式环流异常和经向风正异常中心, 暴雨区处于强西南气流入口区辐散场控制, 利于垂直运动的发展。

(4) 在 300 hPa 暖异常中心南侧 (印度半岛北部) 和西侧, 激发 500 hPa 反气旋式环流异常中心和气旋式环流异常中心, 反气旋式环流后部经向风正异常中心将低纬度地区暖湿气

508 流向北输送,与气旋式环流东部偏南气流汇合,并向暴雨区继续输送,为持续性暴雨的发生
509 提供充沛的水汽供应。

510 本文的研究只是给出了中昆仑山北坡一次极端降水期间的水汽输送路径、源地及水汽输
511 送与大尺度环流间的关系,虽然找到了对流层高层温度正异常与降水水汽持续输送的可能性
512 关系,但由于降水问题十分复杂,且样本数量少,在今后的工作中将增加暴雨个例样本数量,
513 给出南疆水汽输送的统计性特征,针对不同水汽输送路径的降水天气过程,开展降水大气三
514 维结构特征研究,揭示造成该地区夏季降水持续时间长、范围大的成因,从而更好的理解极
515 端干旱区暴雨的发生、发展机制,使该地区夏季暴雨定时、定量预报能够得到实质性的进展。

516

517 参考文献

- 518 Akiyo Yatagai and Tetsuzo Yasunari. 1998. Variation of summer water vapor transport related to precipitation over and around
519 the arid region in the interior of the Eurasia continent[J]. *J.Meteor.Soc.Japan*, 76(5):799-815,
520 doi:10.2151/jmsj1965.76.5_799.
- 521 曹云昌,方宗义,夏青. 2005.GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析[J].*应用气象学报*, 16(1): 54-59. Cao
522 Yunchang, Fang Zongyi, Xia Qing. 2005. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation [J]. *Journal*
523 *of Applied Meteorological Science*, 16(1): 54-59.
- 524 陈娇娜,李国平,黄文诗,等. 2009. 华西秋雨天气过程中 GPS 遥感大气可降水量演变特征[J]. *应用气象学报*, 20(6):
525 753-760. Chen Jiaona, Li Guoping, Huang Wenshi, et al. 2009. The evolution features of precipitable water vapor derived
526 from Ground-based GPS during Autumn rain weather process in West China[J] *Journal of Applied Meteorological Science*,
527 20(6):753-760.
- 528 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京: 科学出版社, p293. Ding Yihui. 1989. *The Dynamic Analysis*
529 *Method of Diagnosis*[M]. Beijing: Science Press, p293.
- 530 Ding, Y. H., and J. C. L. Chan, 2005: The East Asian summer monsoon: an overview. *Meteor. Atmos.Phys.*, 89, 117 - 142, doi:
531 10.1007/s00703-005-0125-z
- 532 Ersek V, Mix AC, Clark PU. 2010. Variations of 18O in rainwater from southwestern Oregon[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.* 115:
533 D09109.
- 534 Fontaine, B., P. Roucou, and S. Trzaska, 2003. Atmospheric water cycle and moisture fluxes in the West African monsoon:
535 Mean annual cycles and relationship using NCEP/NCAR reanalysis[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1117,
536 doi:10.1029/2002GL015834.
- 537 江志红,梁卓然,刘征宇,等. 2011. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J].*大气科学*, 35(2): 361-372. Jiang
538 Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al. 2011. A Diagnostic Study of Water Vapor Transport and Budget during Heavy
539 Precipitation over the Huaihe River Basin in 2007[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 35(2): 361-372.
- 540 Jin, S. G., J. U. Park, J. H. Cho, and P. H. Park, 2007. Seasonal variability of GPS-derived zenith tropospheric delay (1994 -
541 2006) and climate implications[J]. *J. Geophys. Res.*, 112
- 542 郭楠楠,周玉淑,邓国. 2019. 中亚低涡背景下阿克苏地区一次强降水天气分析[J]. *气象学报*, 77(04): 686-700. GUO
543 Nannan, ZHOU Yushu, DENG Guo. 2019. Analysis of a severe precipitation process in Aksu area under the background of
544 the Central Asian Vortex[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(4): 686-700.
- 545 韩兴胜. 2017. 中昆仑山北坡降水量变化特征分析[J]. *人民长江*, 48(2): 85-88
- 546 Huang Wei, Feng Song, Chen Jianhui, et al. 2015. Physical mechanisms of summer precipitation variations in the Tarim Basin in
547 northwestern China[J]. *Huang ET AL*, 28(9):3579-3591, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00395.

548 Li J., YU R.C., Yuan W.H., et al. 2011. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern
549 China in the past 40 years[J]. *Journal of climate*,24:5683-5690.

550 李海花, 闵月, 李校宇, 等. 2022. 昆仑山北麓两次极端暴雨水汽特征对比分析[J]. *干旱区地理*, 45(3):715-724. Li Haihua,
551 Min Yue, Li Anbei, et al. 2022. Comparative analysis of on water vapor characteristics of two extreme rainstorms in the
552 north slope of Kunlun Mountains[J]. *ARID LAND GEOGRAPHY*, 45(3):715-724.

553 刘晶, 杨莲梅. 2017. 一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨 GPS 大气水汽总量演变特征[J]. *气象*, 43(6):724-734. Liu Jing, YANG
554 Lianmei. 2017. Development Features of GPS Atmospheric Precipitable Water Vapor in Heavy Rainfall Caused by Central
555 Asia Vortex on the North Slope of Tianshan Mountain[J]. *Meteor Mon*, 43(6):724-734.

556 刘晶, 周玉淑, 杨莲梅, 等. 2019. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J]. *大气科学*, 43(5):959-974. Liu Jing, Zhou
557 Yushu, Yang Lianmei, et al. 2019. A Diagnostic Study of Water Vapor during An Extreme Precipitation Event in the Yili
558 River Valley[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 43(5): 959-974.

559 廖晓农, 倪允琪, 何娜, 等. 2013. 导致“7.21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J]. *气象学报*,
560 71(6):997-1011. Liao Xiaonong, Ni Yunqi, He Na, et al. 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the
561 extreme moisture environment in the “7.21” heavy rain case[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(6):997-1011,
562 doi:10.11676/qxxb2013.081.

563 林振耀, 吴祥定. 1990. 青藏高原水汽输送路径的探讨[J]. *地理研究*, 9(3):33-40. Lin Zhenya and Wu Xiangding. 1990. A
564 preliminary analysis about the tracks of moisture transportation on the Qinghai -Xizang plateau(in Chinese)[J]. *Geogr.Res.*,
565 9(3):33-40.

566 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等. 2015. 广东 6 月持续性暴雨期间的大气环流异常[J]. *气象学报*, 73(05): 803-818. LIN Ailan,
567 GU Dejun, LI Chunhui, et al. 2015. Anomalous atmospheric circulation characteristics of the sustained torrential rainfall
568 over Guangdong in June[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, (5): 803-818.

569 Makra L, Matyasovszky I, Guba Z, et al. 2011. Monitoring the long-range transport effects on urban PM10 Levels using 3D
570 clusters of backward trajectories[J]. *Atmos. Environ*, 45(16):2630-2641, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.02.068.

571 努尔比亚·吐尼亚孜, 张超, 李泽巍, 等. 2019. 南疆西部 2016 年 8 月 4 次暴雨过程特征分析[J]. *干旱气象*,
572 37(2):301-311. Tunyaz Nuerbiya, Zhang Chao, Li Zewei, et al. 2019. Characteristics of four rainstorm processes in the west
573 of southern Xinjiang in August 2016[J]. *J. Arid Meteor*, 37(2):301-311.

574 Park, C.-K., and S. D. Schubert, 1997: On the nature of the 1994 east Asian summer drought. *J. Climate*, 10, 1056 - 1070.

575 全美兰, 刘海文, 朱玉翔, 等. 2013. 高空急流在北京“7.21”暴雨中的动力作用[J]. *气象学报*, 71(6): 1012-1019. Quan
576 Meilan, Liu Haiwen, Zhu Yuxiang, et al. 2013. Study of the dynamic effects of the upper-level jet stream on the Beijing
577 rainstorm of 21 July 2012[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, (6): 1012-1019.

578 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 23(2):152-164. Shi
579 Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruyi. 2003. Discussion on the Present Climate Change from Warm-Dry to Warm-Wet in
580 Northwest China [J]. *Quaternary Sciences*, 23(2):152-164, doi:10.3321/j.issn:1001-7410.2003.02.005.

581 Sun B, Zhu Y L, and Wang H J. 2011. The Recent Interdecadal and Interannual Variation of Water Vapor Transport over Eastern
582 China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(05):1039-1048

583 Sun Wei, Yu Rucong, Li Jian, et al. 2015. Three-Dimensional circulation structure of summer heavy rainfall in central North
584 China[J]. *Weather and Forecasting*, 30(1), 238-250, doi:10.1175/WAF-D-14-00046.1.

585 孙力, 马梁臣, 沈柏竹, 等. 2016. 2010 年 7-8 月东北地区暴雨过程的水汽输送特征分析[J]. *大气科学*, 40(3):630-646.
586 Sun Li, Ma Liangchen, Shen Baizhu, et al. 2016. A Diagnostic Study of Water Vapor Transport and Budget of Heavy
587 Rainfall over Northeast China during July to August 2010[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 40(3): 630-646.

588 孙建华, 汪汇洁, 卫捷, 等. 2016. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征[J]. *气象学报*, 74(4): 542-555. SUN
589 Jianhua, WANG Huijie, WEI Jie, et al. 2016. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall
590 events in the Yangtze-Huaihe River Valley[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(4): 542-555.

591 Sjostrom JM, Welker JM. 2009. The influence of air mass source on the seasonal isotopic composition of precipitation, eastern

592 USA[J]. *J. Geochem. Explor.* 102: 103 - 112.

593 Stohl A, James P. 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I : Method Description,
594 Validation, and Demonstration for The August 2002 Flooding in Central Europe[J]. *Journal of Hydrometeorology*,
595 5(4):656-678, doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0656:ALAOTA>2.0.CO;2

596 Strong M, Sharp ZD, Gutzler DS. 2007. Diagnosing moisture transport using D/H ratios of water vapor[J]. *Geophys. Res. Lett.*
597 34: L03404.

598 Tomonori Sato, Fujio Kimura.2005. Diurnal Cycle of Convective Instability around the Central Mountains in Japan during the
599 Warm Season[J].*Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(5):1626-1636.

600 万蓉, 付志康, 李武阶, 等.2015.地基 GPS 斜路径水汽反演技术及资料应用初探[J].*气象*, 41 (4) : 447-455.Wan Rong, Fu
601 Zhikang, Li Wujie, et al. 2015. Slant Path Water Vapor Retrieval with GPS and Application in Rainstorm Analysis[J].
602 *Meteor Mon*,41(4):447-455.

603 Wang, J., L. Zhang, et al. 2007: A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS
604 measurements[J].*J.Geophys.Res.*, 112, D11107, doi: 10.1029/2006JD007529

605 徐国强, 张迎新. 1999. “96.8”暴雨的水汽来源及对水汽敏感性的模拟分析. *气象*, 25(7):12-16. Xu Guoqiang, Zhang
606 Yingxin.1999. The Heavy Rain's Vapor Sources and Vapor Sensitivity Simulation in August 1996[J].*Meteor*
607 *Mon*,25(7):12-16.

608 许有鹏, 高蕴钰, 杨戊, 1994. 昆仑山北坡河流水文水资源特征研究[J].*地理科学*, 14(4): 338-346.Xu Youpeng, Gao Yunyu,
609 Yang wu. 1994. Approach to water resource characteristics of rivers in north slope area of the Kunlun mountains[J].
610 *SCIENTIA GEOGRAPHICA SINICA*,14 (4) : 338-346,

611 肖开提·多莱特. 2005.新疆降水量级标准的划分. *新疆气象*,28(3):7-8.

612 杨柳,赵俊虎,封国林. 2018. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异[J].*大气科学*,42(1):81-95. Yang Liu,
613 Zhao Junhu, Feng Guolin. 2018. Characteristics and Differences of Summertime Moisture Transport Associated with Four
614 Rainfall Patterns over Eastern China Monsoon Region[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(1): 81-95.

615 Yu Rucong, Wang Bin, Zhou Tianjun. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J].
616 *Geophys. Res. Lett.*, 31:L22212. doi:10.1029/2004gl021270

617 Yuan W.H., Yu R.C., Chen H.M., et al. 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over
618 central eastern China[J]. *Journal of climate*,23:6684-6695

619 曾勇, 杨莲梅. 2017. 南疆西部一次暴雨强对流过程的中尺度特征分析[J]. *干旱气象*, 2017, 35(3): 475-484. Zeng Yong,
620 Yang Lianmei. Mesoscale characteristic analysis of a severe convective weather with torrential rain in the west of southern
621 Xinjiang[J]. *Journal of Arid Meteorology*,35(3): 475-484.

622 曾勇, 周玉淑, 杨莲梅. 2019. 新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析[J]. *大气科学*, 43 (2) : 372-388.ZENG
623 Yong, ZHOU Yushu, YANG Lianmei. 2019. A Preliminary Analysis of the Formation Mechanism for a Heavy Rainstorm
624 in Western Xinjiang by Numerical Simulation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 43(2): 372-388.

625 赵玲, 梁红, 崔彩霞. 2006. 乌鲁木齐地基 GPS 数据的解算和应用[J]. *干旱区研究*, 23(4):654-657. Zhao Ling, Liang Hong,
626 Cui Caixia. 2006. Solution and application of the ground-based GPS data in Urumqi, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*,
627 23(4):654-657.

628 赵克明, 黄艳, 于碧馨. 2017. 2013 年南疆西部暴雨天气的水汽特征 [J]. *气象科技*, 45(1): 121-130. Zhao Keming, Huang
629 Yan, Yu Bixin. 2017. Water vapor characteristics of rainstorm weather processes over western south Xinjiang in 2013[J].
630 *Meteorological Science and Technology*, 45(1): 121-130.

631 Zhao, P., R. H. Zhang, J. P. Liu, X. J. Zhou, and J. H. He, 2007: Onset of southwesterly wind over eastern China and associated
632 atmospheric circulation and rainfall. *Climate Dyn.*, 28, 797 - 811, doi: 10.1007/s00382-006-0212-y

633 Zhao Yong, Huang Anning, Zhou Yang, et al. 2014.Impact of the middle and upper tropospheric cooling over Central Asia on
634 the summer rainfall in the Tarim Basin, China[J]. *J Climate*, 27(12):4721-4732, doi:10.1175/JCLI-D-13-00456.1.

635 Zhao siyao, Li Jian, Yu Rucong, et al. 2015. Recent reversal of the upper-tropospheric temperature trend and its role in

- 636 intensifying the East Asian summer monsoon[J], Sci. Rep., 5:11847. doi:10.1038/srep11847.
- 637 张家宝主编. 1986. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. Zhang Jiabao(Editor in chief). 1986. The
- 638 short-term weather forecast guide in Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang People's Press.
- 639 张家宝, 邓子风. 1987. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社. Zhang Jiabao and Deng Zifeng. 1987. Introduction to
- 640 precipitation in Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 641 张云惠, 杨莲梅, 肖开提·多莱特, 等. 2012. 1971-2010年中亚低涡活动特征[J]. 应用气象学报, 23(3): 312-321. Zhang
- 642 Yunhui, Yang Lianmei, Xiaokaiti·Duolaite. 2012. The Central Asian Vortexes Activity During 1971-2010[J]. Journal of
- 643 Applied Meteorological Science, 23(3): 312-321.
- 644 张云惠, 陈春艳, 杨莲梅, 等. 2013. 南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析[J]. 高原气象, 32(1):191-200. Zhang Yunhui,
- 645 Chen Chunyan, Yang Lianmei, et al. 2013. Cause analysis on rare rainstorm in West of Southern Xinjiang[J]. Plateau
- 646 Meteorology, 32(1):191-200, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00019.
- 647 张云惠, 李海燕, 蔺喜禄, 等. 2015. 南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析[J]. 气象, 41(7):816-824.
- 648 Zhang Yunhui, Li Haiyan, Lin Xilu, et al. 2015. Analysis of continuous rainstorm circulation background and the dynamic
- 649 process of synoptic-scale in West of Southern Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 41(7):816-824,
- 650 doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.003.
- 651 周玉淑, 高守亭, 邓国, 等. 2005. 江淮流域2003年强梅雨期的水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 29(2): 195-204. Zhou,
- 652 B. T., and H. J. Wang, 2006: Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the
- 653 Yangtze River valley. J. Geophys. Res., 111(D16109), doi: 10.1029/2005JD007006
- 654 庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等. 2022. 基于HYSPLIT模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征[J]. 气象, 48(3):
- 655 311-323. Zhuang Xiaocui, Li Boyuan, Zhao Jiangwei, et al. 2022. Water vapor characteristics of rainstorm in southern
- 656 Taklimakan desert based on HYSPLIT model analysis[J]. Meteor Mon., 48(3):311-323.

657
658
659