

杜一博,李双双,郭莉,等. 秦巴山区 2021 年一次极端暴雨水汽输送特征及影响系统分析[J]. 陕西气象,2025(1):1-6.

文章编号:1006-4354(2025)01-0001-06

秦巴山区 2021 年一次极端暴雨水汽输送特征及影响系统分析

杜一博^{1,2},李双双¹,郭莉³,冯典¹

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 商洛市气象局,陕西商洛 726000)

摘要:利用陕西省 99 个国家自动站夏季逐小时降水量数据,对 2021 年 8 月 18—22 日秦巴山区极端暴雨过程(“8·21”极端暴雨过程)的水汽来源、水汽输送特征以及关键影响天气尺度系统进行了分析,结果表明:(1)500 hPa 副热带高压脊线西伸后受冷空气影响其北侧形成高空槽,配合 700 hPa 夜间低空急流和 850 hPa 气旋性环流增强,水汽在秦巴山区强烈辐合上升造成极端暴雨天气;(2)“8·21”极端暴雨过程水汽主要来源于孟加拉湾和南海洋面上,秦巴山区南侧存在 850 hPa 高度以上持续的水汽输送,另外,秦巴山区复杂的地形也有利于风速梯度增大和水汽的上升辐合。

关键词:秦巴山区;极端暴雨;水汽输送;概念模型

中图分类号:P458

文献标识码:A

秦巴山区包括秦岭、秦岭以北关中南部平原地区以及巴山和汉江谷地,正好位于我国气候湿润区,山区和谷区交错的复杂地形导致夏季更容易出现极端暴雨事件^[1]。极端暴雨往往会导致山体滑坡和泥石流等次生灾害,对社会经济的发展和人民的生命财产安全造成巨大的危害^[2]。比如:2020 年 8 月秦巴山区洛南县发生极端暴雨洪涝,全县直接经济损失达 20 亿元;2021 年 8 月秦巴山区蓝田县极端暴雨导致房屋倒塌、道路被毁。每年夏季秦巴山区南部的极端暴雨引发的水灾造成的经济损失可达几十亿元^[3],这对极端暴雨的预报预警服务提出了迫切的需求。

前人研究表明极端暴雨在西北东部地区呈现出频率增加和强度增强的趋势,在空间分布上“暖湿化”特征表现为东扩趋势,强降水时间的突发性

和极端性更加明显^[4]。极端降水事件频次趋于增多,开始日期提前、结束日期推迟,且在一些地区夏季大雨以上强度降水和降水日数均明显增加^[5-6]。还有研究指出导致极端暴雨最重要的影响因素是水汽条件,近些年西北地区暖湿化过程为极端暴雨提供了湿润的气候背景^[7-8],而且大尺度环流能影响水汽输送的路径和强度^[9]。比如:夏季海面上的水汽通过东亚夏季风的运输到达中国北方地区,为极端暴雨的出现创造了有利条件^[10-11],作为东亚夏季风重要组成系统之一的西太平洋副热带高压(下简称副高),水汽输送强弱受西太副高强度、位置、形态的显著影响^[12-13]。当西太平洋副热带高压偏强(弱)、脊线位置偏北(南)有(不)利于暖湿水汽向秦巴山区输送^[14]。水汽输送是影响秦巴山区极端暴雨形成的重要因

收稿日期:2024-01-29

作者简介:杜一博(1992—),男,汉族,陕西西安人,博士,工程师,主要从事极端天气和灾害性天气预报研究。

通信作者:冯典(1994—),男,汉族,陕西汉中,人,硕士,工程师,主要从事灾害性天气机理及预报。

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0326);秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2022Y-3;2023G-3)

素之一,水汽主要通过中高纬度和低纬度的环流系统配合形成极端暴雨事件。

全球变暖背景下水汽输送的强度和路径也会发生变化,精准分离出对所研究区域极端暴雨起主要作用的水汽通道,并且考虑在垂直运动的前提下讨论水汽输送的特征和重要影响天气尺度系统有助于更好地理解秦巴山区极端暴雨特征。选取2021年秦巴山区降水量最大、影响地域最广、极端性最强的暴雨过程:8月21—22日极端暴雨过程(简称“8·21”极端暴雨过程),分析期间的水汽特征和水汽路径,追踪水汽源地,进一步研究关键影响天气尺度系统,为当地极端暴雨预报预警提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据

所用资料包括2021年8月18—23日陕西省99个国家自动站的夏季逐小时降水量数据(均经过严格质量控制)和同期ERA5逐小时再分析数据(位势高度、比湿、经向风场、纬向风场等),垂直方向1000 hPa~300 hPa共16层,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。文中地图是中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心审图号为GS(2016)1600号的中国地图制作。

1.2 水汽通量方法

整层水汽通量为:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} Vq dp. \quad (1)$$

公式(1)中, g 是重力加速度(m/s^2), q 是比湿(g/kg), p_s 是地表气压(hPa), p_t 是大气上边界气压(hPa), V 代表风矢量(m/s)。风速可分为纬向分量($u, m/s$)和经向分量($v, m/s$),因此整层水汽通量也可以表达为纬向和经向水汽通量,具体如下。

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} uq dp, \quad (2)$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} vq dp. \quad (3)$$

1.3 HYSPLIT-4 模式

目前,秦巴山区极端暴雨天气分析中较少应用拉格朗日方法,但是混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式(HYSPLIT-4)能更深入地了解气块随时间的变化^[15]。该模式可以从时间维度衡量水汽来源和输送路径,还可以定量分析不同通道和

高度的水汽贡献,公式如下:

$$P'(t+\Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t, \quad (4)$$

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t+\Delta t)]\Delta t, \quad (5)$$

式(4)、(5)中, P' 表示第一猜测位置, P 表示终点位置, V 表示时刻 t 处位置为 P 的气块速度(m/s), Δt 表示时间步长,对上个时次的平均速度以及第一猜测位置的速度进行平均,之后再乘以时间步长,可以得到下一时刻质点的位置。

2 结果讨论

2.1 降水实况

本次秦巴山区极端暴雨过程降水范围广、极端性强、降水时段集中(图1a)。强降水主要位于关中中东部和陕南大部分地区,秦巴山区135个乡镇累计降水量超过100.0 mm;强降水主要时段集中在21日20时—22日10时,其中勉县22日00—01时降水量为72.5 mm,汉中、城固、南郑三个相邻的地区22日01—04时累加降水量为133.0 mm,勉县、镇安、石泉、汉阴的日降水量均突破历史极值,极端性非常强。降水的距平场(图1b)也反应出降水极端的特征,安康市3个县的降水距平超出了该站历史均值120.0 mm,汉中市勉县降水距平超过了225.5 mm。

2.2 环流场特征

8月21日08时副高北抬至秦岭南侧一带,秦巴山区在副高控制之下出现了弱降水天气,低层850 hPa有强烈的南风北上,遇到秦岭南侧山体阻挡后偏转向西(图2a),进而形成弱的气旋性环流,同时在我国西北地区(甘肃东部、宁夏一带)受高原槽东移影响有冷空气向南移动。21日20时—22日02时,在高原槽东移带来的冷空气影响下,副高向南退至四川中北部,其脊线北侧形成高空槽,西北侧的冷空气向东南方向移动与西南暖湿气流在关中、陕南西侧交汇。秦巴山区位于槽前位置,在槽前正涡度平流作用下,低层气旋性环流增强(图2b、2c),秦巴山区中西部有强烈的上升运动发展。低层700 hPa存在15 m/s以上的偏南风低空急流,夜间低空急流进一步增强,勉县位于急流轴左前方的正涡度区和气流辐合区,有利于水汽持续输送及不稳定层结的建立。

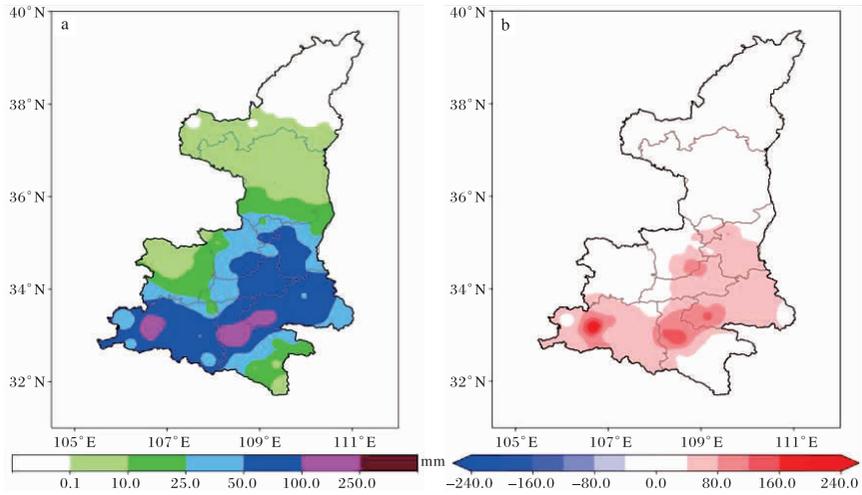


图1 2021-08-21T20—22T20 降雨量实况(a)及降水距平(单位为 mm)空间分布(b)

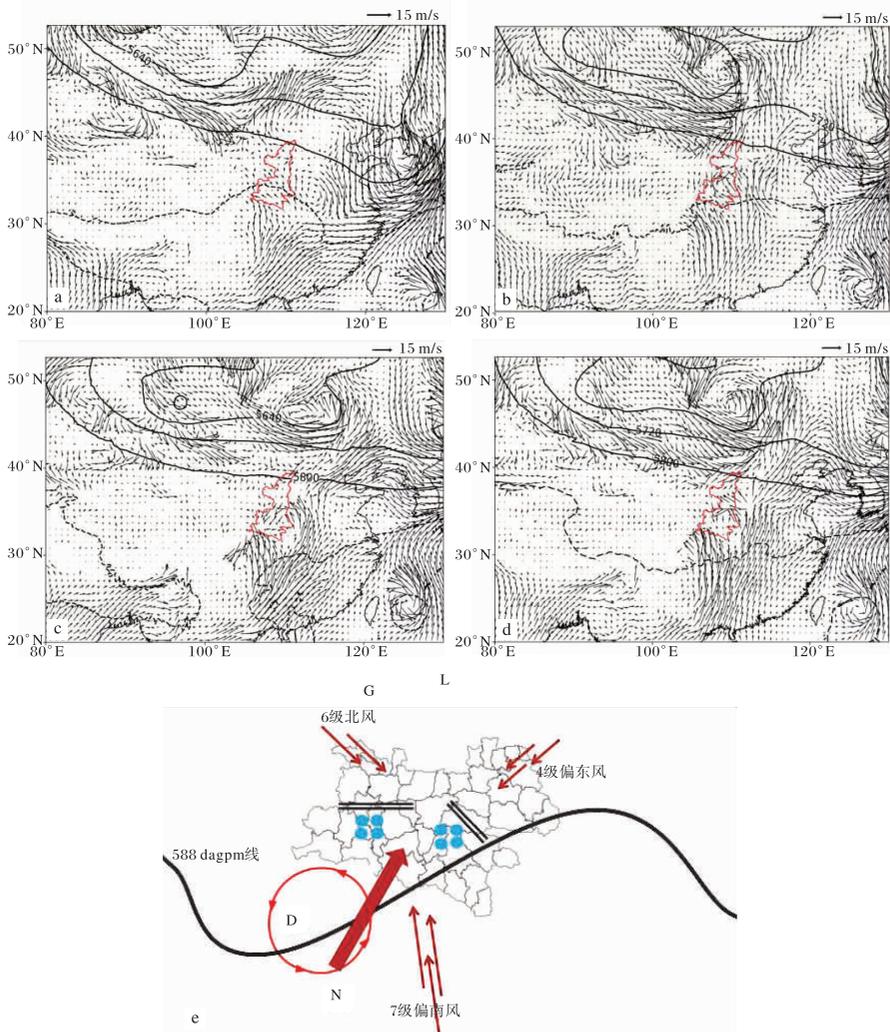


图2 2021-08-21—22 500 hPa 高度场(等值线;单位为 gpm)、850 hPa 风场(矢量;单位为 m/s) (a 21日 08 时;b 21日 20 时;c 22日 02 时;d 22日 08 时)极端暴雨概念图(e 红色圆形环流为 850 hPa 气旋性环流;浅蓝色圆点为极端暴雨落区;黑色双实线为 850 hPa 风切变;G/D 代表高/低压中心; L/N 代表冷/暖中心)

此外,山区起伏的地形也是风速梯度增大的原因之一,勉县、汉台等地区主要以风向切变和风速辐合为主,多个关键影响系统的叠加造成水汽强烈辐合上升,极端暴雨的预报概念图如图 2c 所示。

水汽输送是极端降水过程不可或缺的条件。水汽主要集中在地面至高空 500 hPa 之间,其输送路径和强度在有利的天气尺度环流下能造成极端暴雨。图 3 显示水汽通量逐日演变情况,秦巴山区极端暴雨发生前(20 日,图 3a)并没有明显的

水汽辐合。21 日(图 3b)西南风增强一直持续到 22 日,四川省东北部出现持续的水汽输送和水汽辐合大值区,秦巴山区中西部(勉县等周围地区)也出现水汽辐合。22 日(图 3c)位于 32°N 的四川东北部的西南风转偏西风造成水汽向秦巴山区东部输送,持续的水汽输送和堆积为秦巴山区极端暴雨发生提供了有利的水汽条件。22 日白天到 23 日,秦巴山区由偏西气流转为西北气流,有利于秦巴山区前期堆积的水汽辐散,秦巴大部地区为正的的水汽通量散度(图 3d),降水过程趋于结束。

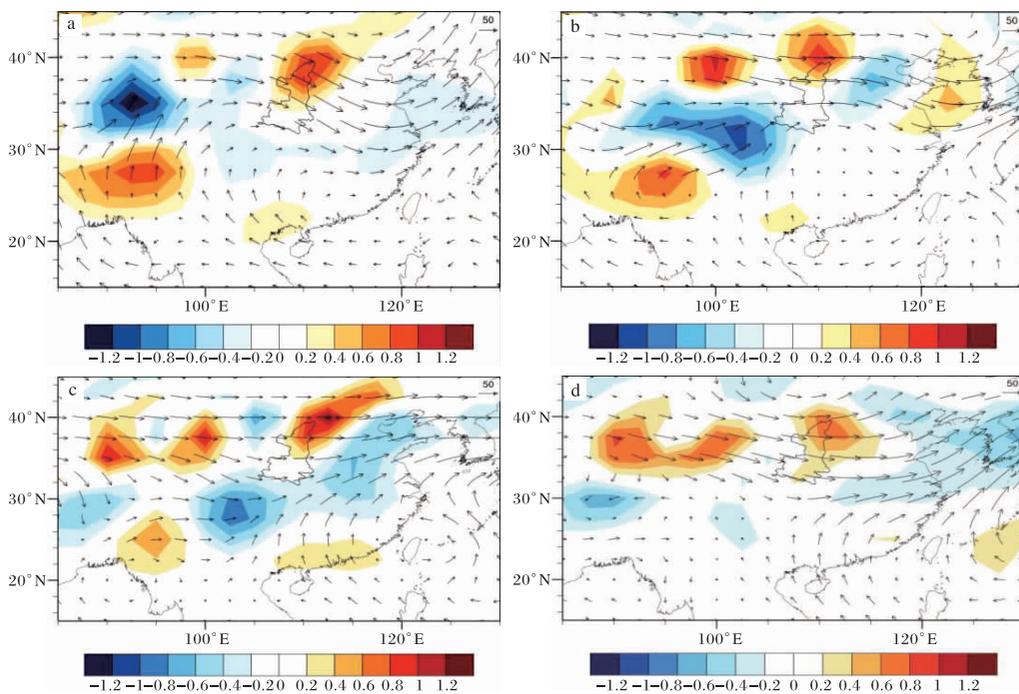


图 3 2021-08-20—23 整层平均(1 000~300 hPa)水汽通量(箭头,单位为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)和水汽通量散度(填色,单位为 $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) (a 20 日;b 21 日;c 22 日;d 23 日)

图 4 给出了 21—22 日不同高度层次上的水汽输送特征。21 日秦巴山区的水汽主要集中在 700 hPa 至地面,水汽受西南风的影响从洋面上持续向北输送,850~700 hPa 水汽主要从孟加拉湾洋面沿贵州、重庆一带北上进入秦巴山区(图 4c),低层 1000~850 hPa 还有另一支从南海向北输送的水汽和孟加拉湾的水汽在中低纬度汇合北上,到达汉江谷地后低层水汽输送方向由北向西偏转导致秦巴山区西侧有明显的水汽辐合,异常的水汽输送也是造成勉县站 24 h 累计降水量接近 240 mm 的主要因素之一。过程中强降水的时

段主要集中在 21 日夜间至 22 日凌晨,这一时间段北上的水汽进入秦巴山区的路径向东偏移(图 4d、4f),因此秦巴山区东部的镇安、石泉、汉阴等地有充沛的水汽供应。

3.4 水汽路径追踪

选取降水最严重的两个地区(勉县、汉阴)追踪模拟当天的水汽来源和输送路径。从图 5a 和图 5c 可以看到,对流层低层主要有 2 支水汽从南侧进入秦巴山区,其中一支来源于孟加拉湾洋面,沿着西南方向到达秦巴山区上空,另一支来自南海的水汽一路北上到达秦巴山区。为了更好地地理

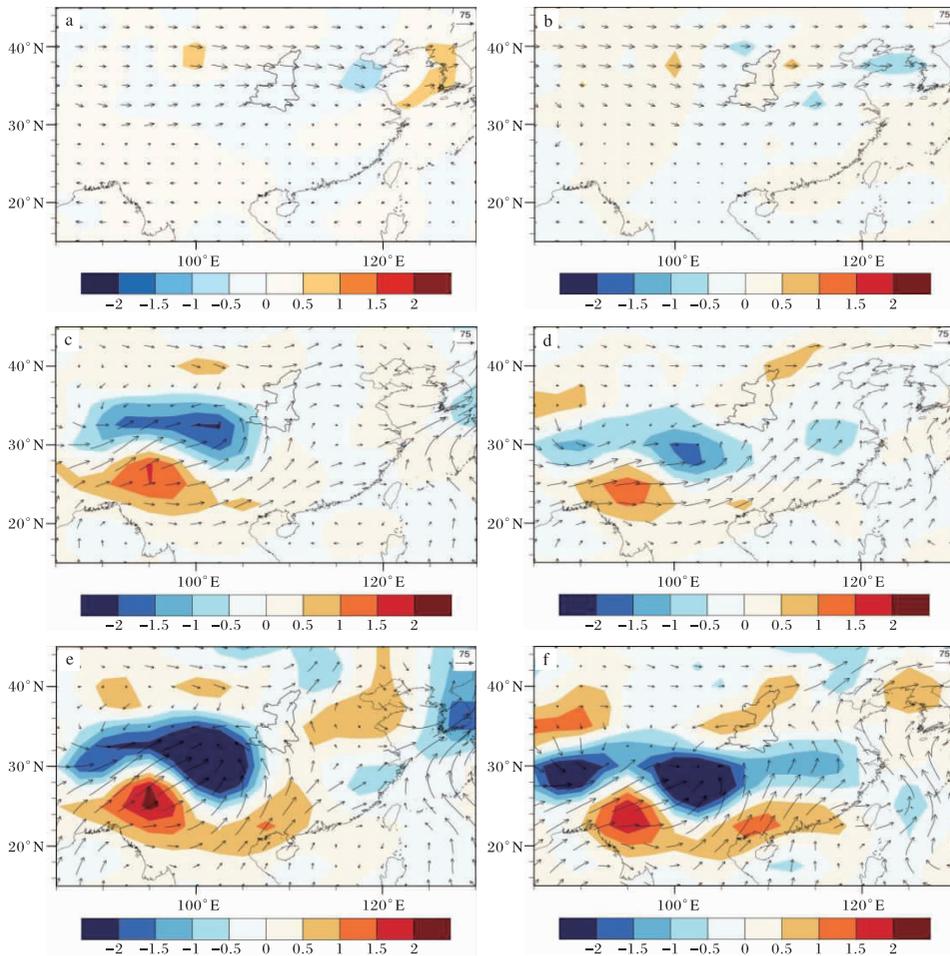


图4 2021-08-21—22 各层日平均水汽通量(箭头,单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)及其水汽通量散度(填色,单位: $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)空间分布 (a 21日 700~300 hPa;b 22日 700~300 hPa;c 21日 850~700 hPa;d 22日 850~700 hPa;e 21日 1 000~850 hPa;f 22日 1 000~850 hPa)

解水汽在输送中上升或下沉的变化,图 5b 和图 5d 是不同时间水汽轨迹随高度的变化,两个时次的运动轨迹均在对流层下层,且随着时间推移气块不断抬升。由于两支水汽源地都在洋面,可以看到起初气块在海面上高度较低的上空运动(约 880 hPa),进入云贵高原后受地形抬升作用,气块抬高至 700 hPa 左右,下高原之后高度降低并持续向北输送,随后从四川的东北区域进入秦巴山区,由于勉县地处汉江谷地,受南侧大巴山地形影响气块抬升幅度减小。汉阴站上空的水汽来源与路径和勉县大体相似,只是水汽进入的位置相对偏东一些,这里不再赘述。

4 结论

对 2021 年 8 月 18—22 日秦巴山区一次极端暴雨过程中的水汽输送特征、水汽来源以及关键

天气尺度系统进行了分析,主要结论如下。

(1)副热带高压脊线西伸后,其北侧脊线回落至四川北部的秦巴山区形成高空槽。低层 850 hPa 东南风受秦岭阻挡偏转形成气旋性环流,同时夜间受低空急流影响,风切变和风速辐合增强,多个系统叠加给极端暴雨提供了动力条件。

(2)在极端暴雨发生前,来自孟加拉湾和南海的暖湿水汽在秦岭南麓持续积聚为暴雨发生提供了充足的水汽。此外,秦巴山区的地形起伏导致风速梯度增大和水汽的抬升,也是此次极端暴雨发生的原因之一。

(3)秦巴山区出现暴雨事件极端性的程度取决于多个系统的叠加,因此在预报时有必要关注短时间内由弱变强的天气系统与稳定天气系统的叠加效应。

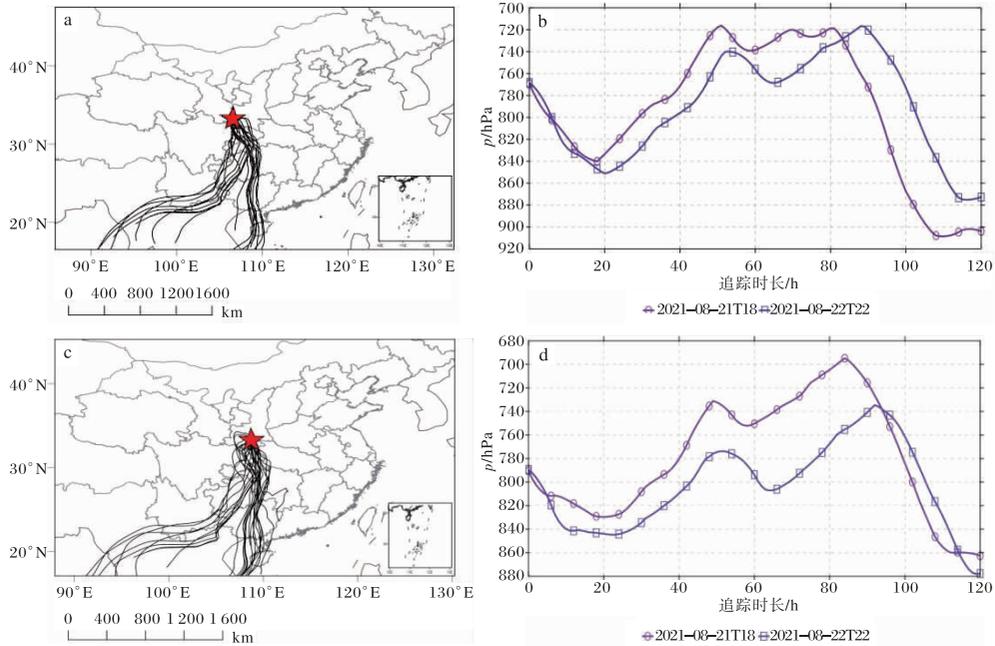


图5 极端暴雨水汽输送轨迹空间分布(a 勉县站;c 汉阴站)和水汽随高度的变化(b 勉县站;d 汉阴站)(a,b 图为 21 日 18 时向前追踪 120 h,c,d 图为 22 日 00 时向前追踪 120 h)

参考文献:

- [1] 郑驰, 刘元珺, 王云鹏, 等. 陕西秦巴山区西南涡暴雨特征[J]. 陕西气象, 2024(1), 24-28.
- [2] 李静睿. 陕南两次西南涡引发的短时暴雨对比分析[J]. 陕西气象, 2022(1), 9-16.
- [3] 廖伟, 程志刚, 李跃清. 基于 TRMM 数据的秦巴山区降水特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(1), 11-17.
- [4] LU S, HU Z, YU H, et al. Changes of extreme precipitation and its associated mechanisms in Northwest China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(10), 1665-1681.
- [5] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(增刊 2), 3757-3771.
- [6] 肖贻青, 郭莉, 汪媛媛, 等. 秦巴山区近 30 年暴雨和短时强降水时空特征分析[J]. 陕西气象, 2023(3), 31-36.
- [7] MA Z, FU C. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51, 2913-2925.
- [8] 陈发虎, 陈婕, 黄伟. 东亚夏季风减弱诱发我国西北干旱区降水增加[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(5), 824-826.
- [9] 杨柳, 赵俊虎, 封国林. 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, 2018, 42(1), 81-95.
- [10] WANG L, QIAN Y, ZHANG Y, et al. Observed variability of summer precipitation pattern and extreme events in East China associated with variations of the East Asian summer monsoon[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36, 2942-2957.
- [11] LI S, SHEN B, BO S, et al. The influences of East Asian monsoon on summer precipitation in Northeast China[J]. Climate Dynamics, 2017, 48, 1647-1659.
- [12] HUANG Y Y, WANG H J, FAN K, et al. The Western Pacific subtropical high after the 1970s: westward or eastward shift? [J]. Climate Dynamics, 2015, 44, 2035-2047.
- [13] YANG R, XIE Z, JIE C. A dynamic index for the westward ridge point variability of the Western Pacific subtropical high during summer[J]. Journal of Climate, 2017, 30, 3325-3341.
- [14] 赵庆云, 宋松涛, 杨贵名, 等. 西北地区暴雨时空变化及异常年夏季环流特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(4), 517-522.
- [15] 孟鸿飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黑河上游降水同位素特征及其水汽来源分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3), 937-951.