

杨璐瑛, 刘畅, 杨成芳, 等. 不同天气系统影响下强降雨过程 GPS 可降水量变化特征对比[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 475-482, [YANG Luying, LIU Chang, YANG Chengfang, et al. Variation Characteristics of GPS Precipitable Water Vapor During Typical Heavy Rainfall Processes Under Different Synoptic Systems[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 475-482], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0475

不同天气系统影响下强降雨过程 GPS 可降水量变化特征对比

杨璐瑛¹, 刘畅², 杨成芳², 韩永清²

(1. 山东省气象局科技与预报处, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要:利用常规地面高空观测资料、山东省 123 个自动站 1 h 降雨量资料和 25 个地基 GPS 反演的大气可降水量资料, 对比分析不同天气系统影响下典型强降雨过程中的大气可降水量变化特征。结果表明: (1) 降雨开始前水汽累积时间与天气系统尺度有密切关系, 一般尺度越大, 水汽累积时间越长, 低槽冷锋强降雨前大气可降水量的积累时长可达约 26 h, 副高边缘强降雨发生前水汽累积时间仅 5~6 h; (2) 水汽增速与天气系统尺度密切相关。天气系统尺度越小增速越快, 低槽冷锋强降雨发生前水汽增速小于 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 副高边缘强降雨发生前水汽增速可达 $3.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; (3) 短时强降雨发生前, 水汽累积时间与积累速度呈反相关, 即水汽增速越快, 强降雨发生越快, 当水汽增速大于 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 可降水量经历 5~6 h 积累即可产生短时强降雨; (4) 一般强降雨时段多数在可降水量峰区时段, 而副高边缘型短时强降雨和冷式切变线第 1 阶段强降雨均发生在可降水量增长时段。降雨过程结束后, 一般情况下可降水量锐减, 而副高边缘型和冷式切变线第 1 阶段强降雨结束后可降水量继续增长。冷式切变线第 2 阶段降雨结束后可降水量出现持续小幅减小, 数小时后, 可降水量再次增长。

关键词:典型强降雨; 大气可降水量; 演变特征; 对比分析

文章编号:1006-7639(2018)03-0475-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0475

中图分类号:P458

文献标志码:A

引言

水汽在大气中含量很少, 变化范围约为 0~4%, 是大气中极其活跃的成分, 在自然界中常以云、雾、雨、雪、霜、露等形式存在。水汽在相变过程中有热量的释放与吸收, 可以改变大气温度场结构, 进而影响风、压、湿等重要气象要素的分布。水汽含量及其变化是天气和气候变化的重要驱动力, 是灾害性天气形成和演变的重要影响因子之一。因此, 水汽的探测和跟踪是天气预报业务中的基本问题之一。

地基全球定位系统(global position system, GPS) 遥感大气可降水量是 1990 年代发展起来的技术^[1-3], 由于其具有高精度、高时空分辨率、探测不受天空状况影响、成本低等诸多优点, 成为目前水汽探测的关键技术。我国的 GPS 气象学起步于 1990

年代中期, 毛节泰^[4]引进并较详细介绍了地基 GPS 反演大气可降水量的方法; 王小亚等^[5]利用地面 GPS 站探测大气的技术, 从地面 GPS 站的观测和表面气象参数得出了天顶湿延迟的估计, 并由它和可降水量(precipitable water vapor, P_{wv})之间的转换关系得出了可降水量估计; 李成才等^[6]研究了 GPS 地基遥感水汽的基本原理和方法, 利用软件等进行解算, 结合相应的地面气象资料对 GPS 遥感水汽总量进行了反演; 丁金才等^[7]引进并较详细介绍了地基 GPS 反演大气可降水量的方法, 简述了 GPS 产品在长江三角洲地区的应用情况。近年来, 我国气象学者们主要从 GPS 反演大气可降水量效果评估^[8-14]、应用 GPS 可降水量资料改善数值模式初始场^[15-17]、分析 GPS 可降水量资料所揭示的某一区

收稿日期: 2017-08-14; 改回日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475038)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-042)及局校合作科研课题(2015qdxh02)共同资助

作者简介: 杨璐瑛(1984—), 女, 助理工程师, 主要从事天气预报科学研究管理工作. E-mail: yly0727@163.com.

通信作者: 刘畅(1981—), 女, 高级工程师, 主要从事天气预报业务与研究工作. E-mail: liucc99@163.com.

域水汽时空变化特征^[18-21]、GPS 可降水量资料在灾害性天气预报中的应用等方面^[22-28]进行了研究,得到了诸多有实际应用价值的结论。

已有研究中,未见有针对不同天气系统影响下的强降雨过程中 GPS 可降水量演变特征进行的讨论和对比,实际上不同天气系统由于其本身尺度和动力、热力结构的差别,降雨产生的机制有所不同,并且在降雨产生过程中,水汽的输送与积累在时间、速度等方面必然存在显著的差异。本文拟利用 GPS 可降水量资料揭示山东地区 4 次不同天气系统影响下的强降雨过程中水汽的变化特征,为预报提供有益参考。

1 资料与方法

山东省气象部门自 2007 年起开始 GPS 的布点和组网建设工作,截止目前,省内共有 25 个 GPS 站的数据实现了完整连续的接受、解算和应用(时间分辨率 30 min)。25 个地基 GPS 接收站布局如图 1

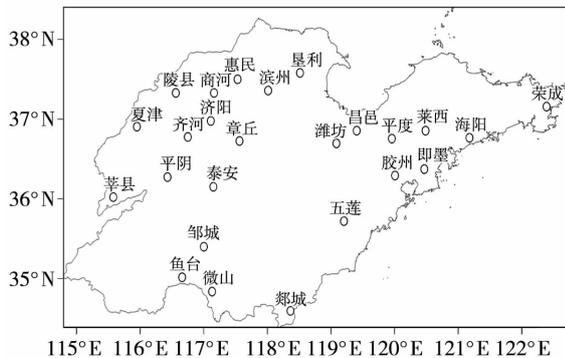


图 1 山东省地基 GPS 站分布

Fig. 1 Distribution of GPS stations in Shandong Province

所示, GPS 水汽观测站均建在气象观测场内或附近。

利用山东省 2013 年 7 月常规地面观测资料、高空探测资料、123 个有人值守的国家自动站 1 h 降雨量资料和地基 GPS 反演大气可降水量资料,从中选取低槽冷锋(2013 年 7 月 14—16 日)、副高边缘(2013 年 7 月 9 日)、冷式切变线(2013 年 7 月 8—12 日)和暖式切变线(2013 年 7 月 3—5 日)4 种天气系统影响下的强降雨过程,剖析在不同动力和热力结构特征下强降雨过程中水汽的演变特征。

2 不同天气系统影响下强降雨过程 GPS 可降水量变化特征

2.1 低槽冷锋强降雨过程可降水量变化特征

2.1.1 过程概况

2013 年 7 月 14 日夜间至 16 日,受低槽冷锋 [图 2(a)] 影响,山东地区出现强降雨过程,全省平均降雨量 27.8 mm,降水量分布不均,暴雨点零散分布在鲁西北、鲁中西部和鲁南地区 [图 2(b)], 为典型的低槽冷锋降雨。研究选取出现强降雨并同时安设 GPS 水汽探测仪的站点郯城站(降雨量 23.8 mm)和垦利站(降雨量 47.9 mm),考察低槽冷锋暴雨过程中可降水量表现特征及其与降水的关系,分析发现两个站水汽变化特征相似,因此仅以垦利站为代表进行具体阐述。

2.1.2 可降水量变化特征

图 3 反映了低槽冷锋降雨过程中垦利站大气可降水量变化特征:(1) 垦利站 16 日降雨时段为 03:00—09:00(北京时,下同),降雨时段与可降水量峰值时段同步。16 日 07:00 降雨强度最大为

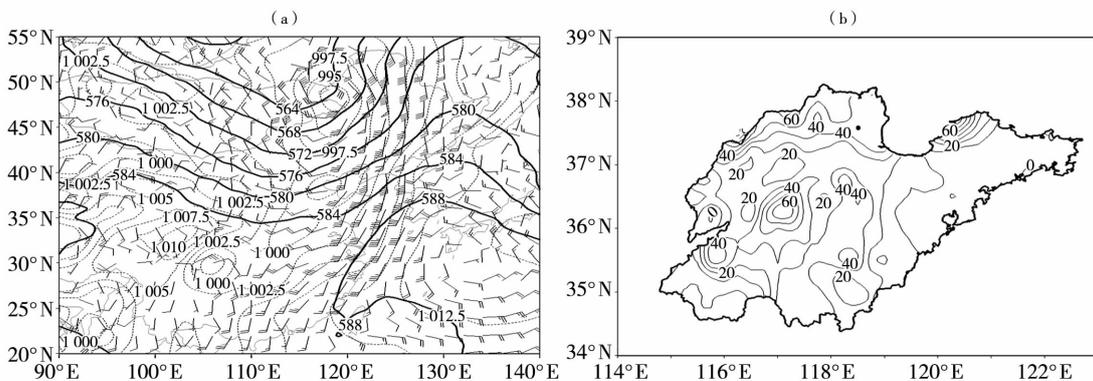


图 2 2013 年 7 月 15 日 20:00 500 hPa 高度场(实等值线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风向杆,单位: $m \cdot s^{-1}$)、海平面气压场(虚等值线,单位:hPa)的叠加(a)及 2013 年 7 月 16 日 00:00—12:00 山东省累计降雨量(b)(等值线,单位:mm;黑色实心点为垦利站)

Fig. 2 The weather chart of 500 hPa height (solid contour lines, Unit:dagpm), 850 hPa wind (stem, Unit: $m \cdot s^{-1}$) fields and sea level pressure (dotted contour lines, Unit:hPa) (a) at 20:00 BST on 15 July 2013, the accumulated precipitation during 00:00 - 12:00 BST on 16 July 2013 in Shandong Province (contours, Unit:mm;the solid black point for Kenli station) (b)

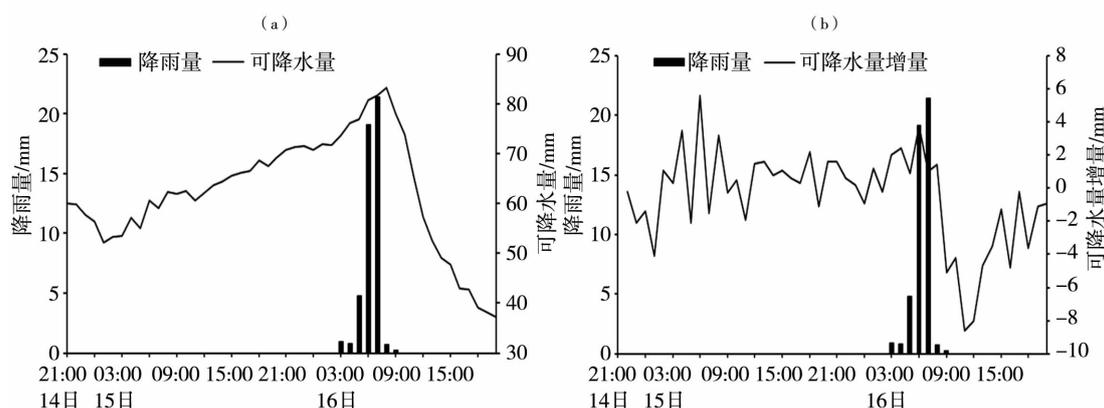


图3 2013年7月14日21:00至16日20:00 垦利站1 h降雨量与可降水量时间序列(a)和1 h可降水量增量时间序列(b)叠加

Fig. 3 The superposition of hourly precipitation and P_{wv} (a) and hourly increment of P_{wv} time series (b) at Kenli station from 21:00 BST on 14 to 20:00 BST on 16 July 2013

$21.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此时可降水量为 81.8 mm ,接近峰值 83.2 mm (出现时间为 08:00)。(2)可降水量的增长发生在降雨开始前约 26 h。垦利站的降雨开始于 16 日 03:00,可降水量增加开始于 15 日 01:00 左右。(3)最大雨强发生前,可降水量的增长经历了两个阶段,分别为缓慢增长阶段和快速增长阶段。垦利站 16 日 07:00 1 h 降雨量为 21.4 mm ,在此之前约 5 h,可降水量平均 1 h 增量为 2.0 mm ,为快速增长阶段;而从可降水量开始增加时至降雨开始前,即 15 日 01:00 至 16 日 02:00,可降水量平均 1 h 增量仅为 0.8 mm ,为缓慢增长阶段。(4)降水全部结束后,可降水量锐减。

2.2 副高边缘强降雨过程可降水量变化特征

2.2.1 过程概况

2013 年 7 月 9 日受副高边缘[图 4(a)]影响,半岛地区产生分散性强降雨,9 日 06:00—14:00,平度、莱西和招远 3 站出现了暴雨[图 4(b)],选择安设了 GPS 水汽探测仪的平度和莱西两站(降雨量分别为 40.4 mm 、 52.2 mm)分析其可降水量变化,文中仅展示对莱西站的分析结论。此次研究的副高边缘降雨特指发生在盛夏季节副高西北侧边缘的西南气流里的对流性降雨。8 日 20:00 至 9 日 08:00,500 hPa 高原槽与南支低槽合并加深,导致低槽与副高之间位势梯度加大,这一变化反映在 850 hPa 等压面(图略)上,表现为低空一支西南急流的建立。9 日 08:00,山东地区恰位于急流前方,而此时,冷空气位置仍偏后,700 hPa 切变线位于河北山西境内,山东西北部地区的降雨为受切变线影响产生的降雨,而距离较远的鲁东南和半岛地区的降雨为副高边缘降雨。

2.2.2 可降水量变化特征

图 5 是副高边缘强降雨过程中莱西站大气可降水量的变化,可以看出:(1)副高边缘降雨过程中,降雨发生在可降水量持续增长过程中,降雨结束后可降水量继续增长,而后大气可降水量维持一个较高水平。(2)短时强降水发生前约 6 h,水汽开始增加,水汽积累时间较短。莱西站短时强降水发生于 9 日 09:00,可降水量积累自 9 日 03:00 开始。(3)副高边缘的短时强降水发生于水汽快速增长时段。莱西站在短时强降水发生前水汽平均增长速度为 $3.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3 冷式切变线强降雨过程可降水量变化特征

2.3.1 过程概况

2013 年 7 月 8—12 日,受低空冷式切变线[图 6(a)]影响,山东出现大范围强降雨[图 6(b)],全省平均降雨量 73.9 mm ,暴雨区主要位于鲁西北、鲁中北部和半岛地区,全省共 123 个县(市),其中有 36 个县(市)出现大暴雨,有 2 个县(市)出现特大暴雨,分别为招远(286.6 mm)和莱州(288.8 mm),考虑到出现强降雨的站点需要同时布设有 GPS 水汽观测站,选择滨州站为研究对象,9 日 00:00 至 10 日 12:00 其累计降水量为 155.5 mm 。9 日 20:00 500 hPa 副高强大,脊线位于 22°N 附近,西风槽位于河套地区,西风带高压脊同副高叠加,使得副高加强,同时西风槽东移受阻(图略)。10 日 08:00 700 hPa 切变线自山西经河北延伸至渤海,并且其南部有低空急流存在,冷式切变线出现时环流形势稳定,此次降雨过程自 8 日下午开始至 12 日夜间结束,降雨持续时间长、雨强大、范围广。

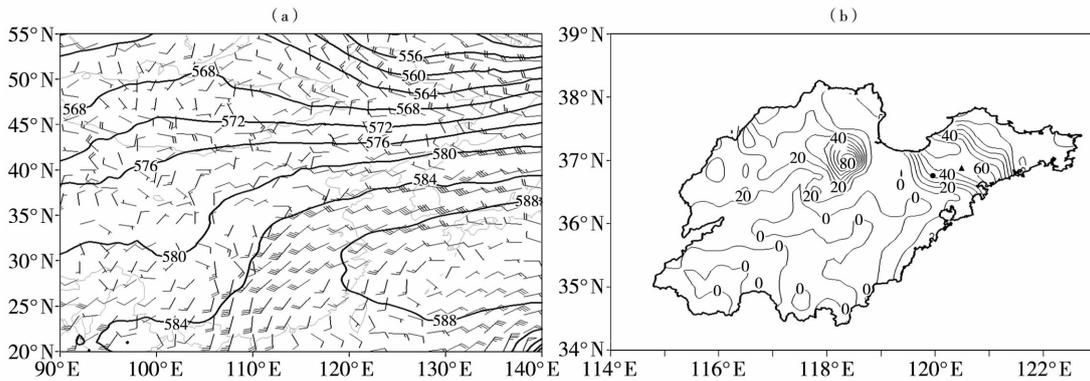


图4 2013年7月9日08:00 500 hPa 高度场(实等值线,单位:dagpm)、700 hPa 风场(风向杆,单位: $m \cdot s^{-1}$)(a)及2013年7月9日06:00—14:00 山东省累计降雨量(b)(等值线,单位:mm;黑色圆点为平度站,三角形为莱西站)

Fig. 4 The 500 hPa height (solid contour lines, Unit:dagpm), 700 hPa wind (stem, Unit: $m \cdot s^{-1}$) fields at 08:00 BST (a) and the accumulated precipitation during 06:00 – 14:00 BST in Shandong Province (contours, Unit:mm;the solid black point for Pingdu station and triangle for Laixi station) (b) on 9 July 2013

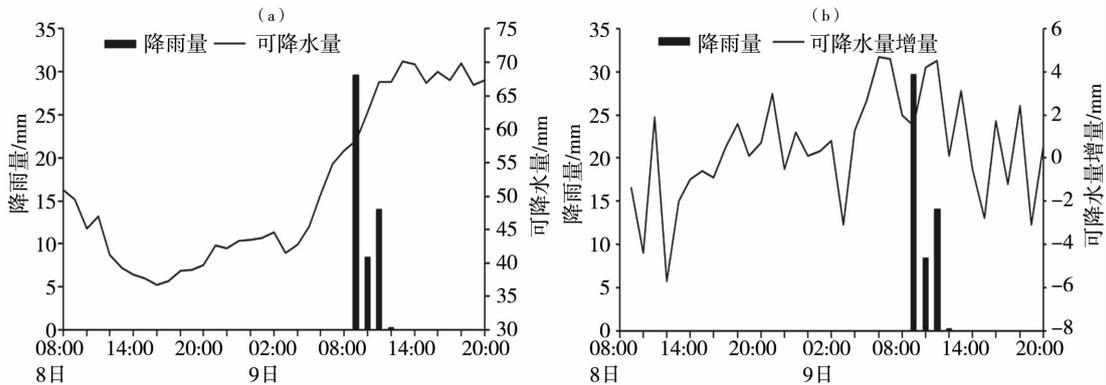


图5 2013年7月8日08:00至9日20:00 莱西站1 h 降雨量分别与 GPS 可降水量时间序列(a)和1 h GPS 可降水量增量时间序列(b)叠加

Fig. 5 The superposition of hourly precipitation and P_{wv} (a) and hourly increment of P_{wv} time series(b) at Laixi station from 08:00 BST on 8 to 20:00 BST on 9 July 2013

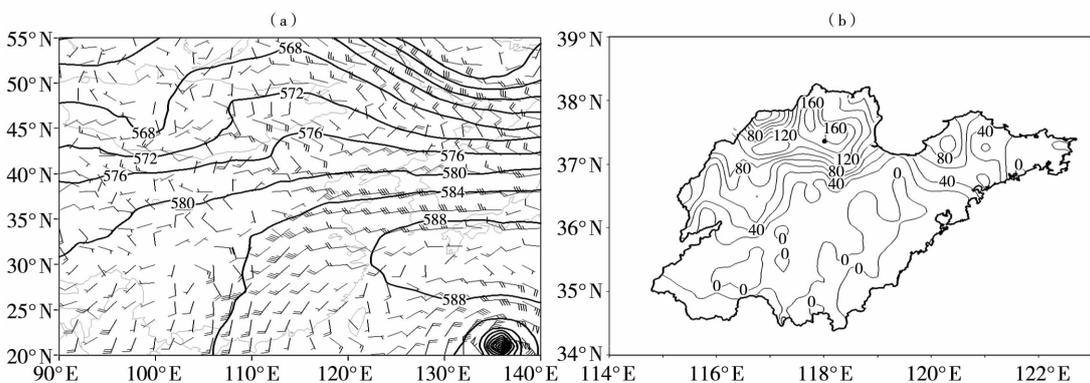


图6 2013年7月10日08:00 500 hPa 高度场(实等值线,单位:dagpm)、700 hPa 风场(风向杆,单位: $m \cdot s^{-1}$)(a)及2013年7月9日00:00至10日12:00 山东省累计降雨量(b)(等值线,单位:mm;黑色实点为滨州站)

Fig. 6 The 500 hPa height (solid contour lines, Unit:dagpm) and 700 hPa wind (stem, Unit: $m \cdot s^{-1}$) fields at 08:00 BST on 10 (a) and the accumulated precipitation from 00:00 on 9 to 12:00 on 10 in Shandong Province (contours, Unit: mm;the solid black point for Binzhou station) (b) July 2013

2.3.2 可降水量变化特征

图7反映了冷式切变线降雨过程中滨州站大气可降水量变化特征:(1)可降水量变化表现出波状变化特征,降雨呈现阶段性特征。滨州站大气可降水量增加开始于9日02:00,第1阶段强降雨发生于9日09:00,此时段内其大气可降水量正呈现增加趋势,第2阶段降雨开始于9日22:00,全部降雨结束后,即10日09:00后,1h可降水量增量表现为振幅较小的负位相,自10日12:00起,可降水量增量再次表现出了振幅较小的正位相。(2)大气可降水量增加速度亦表现出阶段性特征。滨州站第1阶段短时强降水发生前,即9日02:00—08:00,水汽平均增长速度达 $2.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;第2阶段强降雨发生前,即9日09:00—21:00,水汽平均增速仅为 $0.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。(3)水汽增长速度与降雨强度之间并无正相关关系。第1阶段最大降雨强度为

$20.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其水汽增长速度为 $2.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;第2阶段最大降雨强度为 $39.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其水汽增长速度为 $0.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。(4)水汽增长速度与强降雨发生前水汽累积时间呈现反相关关系,即水汽增长速度越快,发生强降雨所需的累积时间越短。滨州站第1阶段强降雨出现前,可降水量以 $2.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度持续增长了约5~6h;第2阶段强降雨开始前,可降水量以 $0.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度持续增长了约12h。

2.4 暖式切变线强降雨过程可降水量变化特征

2.4.1 过程概况

2013年7月3—5日,受低涡前部暖式切变线[图8(a)]影响,山东省出现大范围强降雨,全省平均降水量28.3mm,暴雨区主要位于鲁中南部和鲁南地区[图8(b)],全省123个县(市),30个县(市)出现暴雨,4个县(市)出现大暴雨,大暴雨站

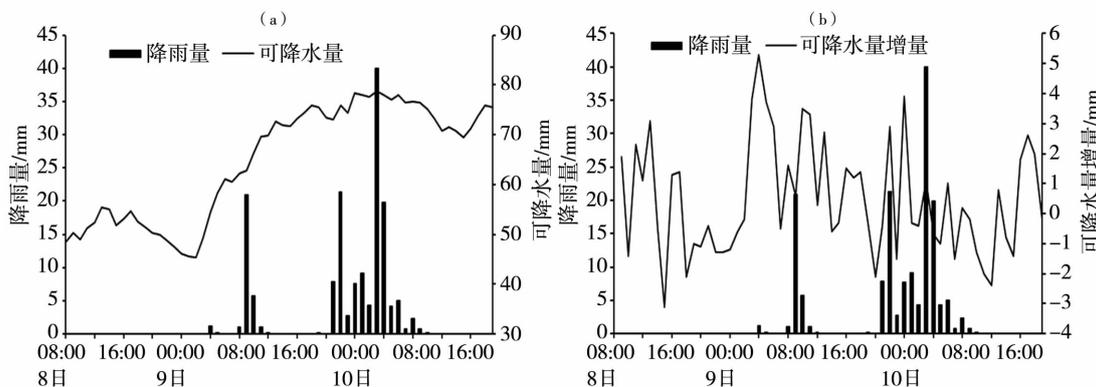


图7 2013年7月8日08:00至10日20:00滨州站1h降雨量分别与可降水量时间序列(a)和1h可降水量增量时间序列(b)叠加

Fig.7 The superposition of hourly precipitation and P_{wv} (a) and hourly increment of P_{wv} time series (b) at Binzhou station from 08:00 BST on 8 to 20:00 BST on 10 July 2013

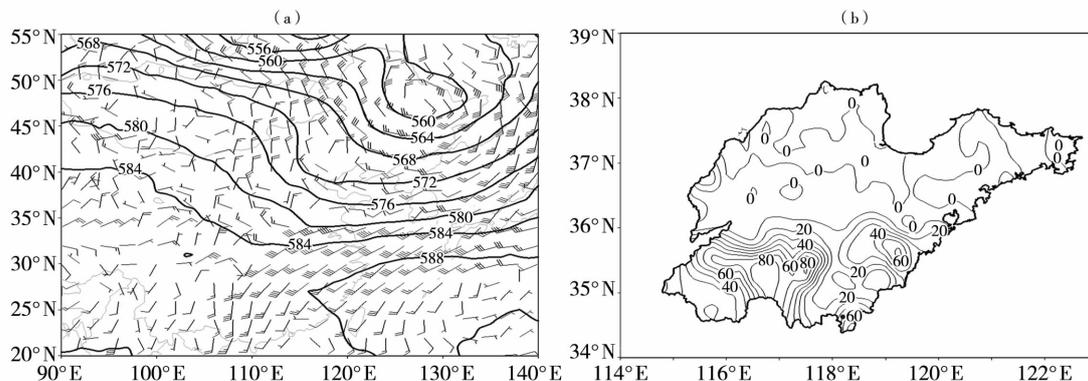


图8 2013年7月4日20:00 500 hPa 高度场(实等值线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风向杆,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) 及2013年7月4日12:00至5日02:00山东省累计降雨量(b) (等值线,单位:mm;黑色实点为郯城站)

Fig.8 The 500 hPa height (solid contour lines, Unit:dagpm), 850 hPa wind (stem, Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) fields at 20:00 BST on 4 (a), and the accumulated precipitation from 12:00 on 4 to 02:00 on 5 in Shandong Province (contours, Unit: mm;the solid black point for Tancheng station) (b) July 2013

点分别为泗水(169.5 mm)、蒙阴(115.2 mm)、临沭(108.6 mm)和郯城(169.6 mm)。2013年7月4日20:00在850 hPa等压面上,切变线影响山东南部,其南侧伴有低空急流。

2.4.2 可降水量变化特征

图9反映了暖式切变线强降雨过程中郯城站大气可降水量的变化特征:(1)可降水量变化表现出了增加、平稳、锐减的特征。降雨开始前,即4日

09:00—16:00,可降水量平均增速为 $1.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;降雨过程中,1 h可降水量增量表现为正负位相夹杂出现,可降水量维持平稳水平;5日02:00全部降雨结束后,1 h可降水量增量表现为明显负位相,大气可降水量锐减。(2)降雨发生时段与可降水量峰值时段同步。(3)降雨开始于可降水量积累约14 h后。郯城站降雨开始于4日16:00,可降水量自4日02:00开始增加,经历约14 h积累。

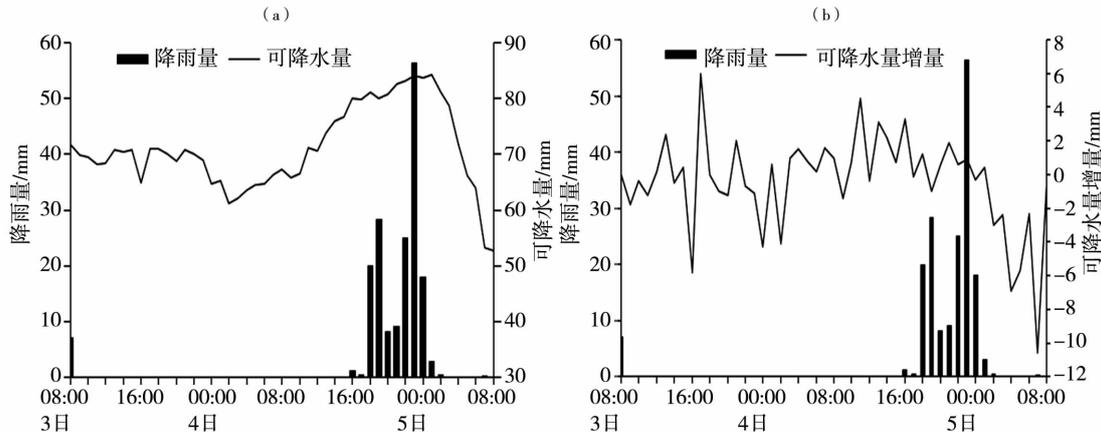


图9 2013年7月3日08:00至5日08:00郯城站1 h降雨量分别与可降水量时间序列(a)和1 h可降水量增量时间序列(b)叠加
Fig. 9 The superposition of hourly precipitation and P_{wv} (a) and hourly increment of P_{wv} time series (b) at Tancheng station from 08:00 BST on 3 to 08:00 BST on 5 July 2013

3 不同天气系统影响下强降雨过程可降水量变化特征对比

由以上4种类型强降雨过程中大气可降水量变化特征的分析可知,不同天气系统影响下,产生强降雨过程中水汽积累持续时间、水汽增长速度、降水结束后可降水量等诸多方面表现了不同特点,天气系统制约了水汽增长方式。下面分别就低槽冷锋、副高边缘、冷式切变线和暖式切变线4种天气系统影响下的强降雨过程中可降水量变化特征做对比分析。

由表1可知:(1)降雨开始前水汽累积时间与天气系统尺度有密切关系,一般尺度越大,水汽累积时间越长。低槽冷锋为典型天气尺度天气系统,其产生强降雨前大气可降水量的积累可长达约26 h;副高边缘降雨过程,均为分散性短时强降雨,发生在中小尺度天气系统中,水汽累积时间仅5~6 h。(2)水汽增速与天气系统尺度密切相关,天气系统尺度越小增速越快。低槽冷锋强降雨发生前水汽增速小于 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,副高边缘

强降雨发生前水汽增速可达 $3.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。(3)短时强降雨发生前,水汽积累速度与水汽累积时间呈反相关,即水汽增速越快,强降雨发生越快。一般当水汽增速大于 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,可降水量经历5~6 h积累即可产生短时强降雨。(4)对于系统性的降雨过程,强降雨时段多数发生在可降水量峰区时段。副高边缘型的短时强降雨发生在水汽增长时段,这与产生降雨机制密切相关。实际上冷式切变线的第1阶段降雨发生在可降水量增加阶段,这表明冷式切变线第1阶段降雨即为副高边缘降雨。(5)并不是所有降雨过程结束后可降水量都锐减。副高边缘强降雨过程发生在可降水量增加阶段,降水结束后可降水量继续增长。对于冷式切变线第2阶段降雨而言,当可降水量出现持续的小幅减小时,意味着降雨的间歇,数小时后,可降水量再次增长表明水汽通道的重建,因此利用高时间分辨率的可降水量资料可判断降雨系统的重建。(6)可降水量值高不是强降雨发生的必要条件。冷式切变线第1阶段强降雨发生时,可降水量仅为40.0 mm。

表 1 不同类型强降雨过程可降水量变化特征对比分析

Tab.1 Contrast analysis of P_{wv} during severe rainfall processes with different types

天气系统	累积时间/h	水汽累积过程 中平均增速/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	强降雨出现 前 1 h 正增量 持续时间/h	降水集中 出现时段	降水结束后 可降水量变化	短时强降雨 出现时可降 水量/mm
低槽冷锋 (2013-07-15)	26	缓慢增长阶段:0.8 快速增长阶段:2.0	5~6	可降水量 峰区	锐减	81.8
副高边缘 (2013-07-09)	6	3.1	5~6	可降水量 增长阶段	继续增长	58.3
冷式切变线 第 1、第 2 阶段 (2013-07-10)	5~6、12	2.9、0.8	5~6、12	可降水量增长 阶段、峰区	继续增长、 小幅减少	62.8、78.7
暖式切变线 (2013-07-04)	14	1.9	7	可降水量峰区	锐减	84.1

4 结 论

(1)低槽冷锋、副高边缘、冷式切变线和暖式切变线 4 种天气系统影响下产生的强降雨过程中,大气可降水量在降雨前水汽累积时间、水汽增长速度和降雨结束后可降水量变化等方面表现出了明显差异,表明不同天气系统产生降雨的不同物理机制。

(2)降雨开始前水汽累积时间与天气系统尺度有密切关系,一般尺度越大,水汽累积时间越长。水汽增速与天气系统尺度密切相关,天气系统尺度越小增速越快。短时强降雨发生前,水汽累积过程中平均增速与水汽累积时间呈反相关,即水汽增速越快,强降雨发生越快。一般当水汽增速大于 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,可降水量经历 5~6 h 积累即可产生短时强降雨。

(3)一般强降雨时段多数发生在可降水量峰区时段。副高边缘型短时强降雨和冷式切变线第 1 阶段强降雨均发生在可降水量增长时段。通常降雨过程结束后可降水量锐减,副高边缘型和冷式切变线第 1 阶段强降雨结束后可降水量继续增长。冷式切变线第 2 阶段降雨结束后可降水量出现持续小幅减小,数小时后,可降水量再次增长,表明水汽输送环流形势重建。

参考文献:

[1] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 (D14):15787-15801.
 [2] ROCKEN C, WARE R, VAN - HOVE T, et al. Sensing atmos-

pheric water vapor with the global positioning system[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(23):2631-2634.
 [3] EMARDSON T R, ELGERED G, JOHANSSON J M. Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of GPS receivers[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (D2):1807-1820.
 [4] 毛节泰. GPS 的气象应用[J]. 气象科技,1993,4:45-49.
 [5] 王小亚,朱文耀,严豪键,等. 地面 GPS 探测大气的最新进展 [J]. 地球科学进展,1997,12(6):519-527.
 [6] 李成才,毛节泰,李建国,等. 全球定位系统遥感水汽总量 [J]. 科学通报,1999,44(3):333-336.
 [7] 丁金才,叶其欣. 长江三角洲地区近实时 GPS 气象网[J]. 气象,2003,29(6):26-29.
 [8] 卢会国,李国平,蒋娟萍. 阳江国际探空试验的 GPS、探空、微波辐射计水汽资料对比分析[J]. 气象科技,2014,42(1):158-163.
 [9] 李伟,赵培涛,郭启云,等. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果 [J]. 应用气象学报,2011,22(4):453-462.
 [10] 王继竹,郭英莲,徐桂荣,等. 湖北省不同资料反演大气可降水量的误差分析[J]. 气象,2014,40(11):1308-1315.
 [11] 任菊章,孙绩华,李建,等. 云南地区 GPS 探测与 3 类再分析可降水量的对比分析[J]. 高原气象,2014,33(6):1480-1489.
 [12] 王洪,雷恒池,杨超,等. 济南地区大气可降水量三种观测反演资料的对比分析[J]. 海洋气象学报,2017,37(2):83-89.
 [13] 宾振,吴瑶,邱璐,等. 江西地基 GPS 遥感大气可降水量变化特征及精度[J]. 高原气象,2013,32(5):1503-1509.
 [14] 胡娟,李伟,曹云昌. 地基 GPS 与常规探空所测可降水量的对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2013,30(1):45-48.
 [15] 曾明剑,张备,周嘉陵,等. GPS/PWV 资料同化在强降雨过程中的定量作用评估[J]. 气象科学,2014,34(1):77-86.
 [16] 张晶,顾松山,楚志刚,等. LAPS 同化 GPS/PWV 资料在暴雨预报中的应用研究[J]. 气象,2014,40(1):76-85.
 [17] 何志新,江杨,张苏,等. 同化 GPS 可降水量资料在安徽地区暴雨预报中的应用[J]. 气象与环境学报,2017,33(2):18-27.

- [18] 段晓梅, 曹云昌. 我国 GPS 反演大气可降水量的时空变化[J]. 气象与减灾研究, 2017, 40(2): 111-116.
- [19] 马思琪, 周顺武, 王烁, 等. 基于 GPS 资料分析西藏中东部夏季可降水量日变化特征[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 318-328.
- [20] 杨磊, 蒋大凯, 王瀛, 等. 辽宁省汛期 GPS 大气可降水量的特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 82-87.
- [21] 石小龙, 尚伦宇, 尹远渊, 等. 大连地区 GPS 反演大气可降水量的变化特征[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1648-1653.
- [22] 周长艳, 唐信英, 邓彪. 一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1636-1647.
- [23] 张恩红, 曹云昌, 王晓英, 等. 利用地基 GPS 数据分析北京“7·21”暴雨水汽特征[J]. 气象科技, 2015, 43(6): 1157-1163.
- [24] 张振东, 魏鸣, 王皓. 用 GPS 水汽监测资料分析一次强对流性降水过程[J]. 气象科学, 2013, 33(5): 492-499.
- [25] 丁海燕, 李青春, 郑祚芳, 等. 利用北京 GPS 监测网分析夏季暴雨的水汽特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 47-58.
- [26] 邓佳, 李国平. 引入地基 GPS 可降水量资料对一次西南涡暴雨水汽场的初步分析[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 400-408.
- [27] 杨莲梅, 王世杰, 史玉光, 等. 乌鲁木齐夏季强降水过程 GPS-PWV 的演变特征[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1348-1355.
- [28] 李军霞, 李培仁, 晋立军, 等. 地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 767-775.

Variation Characteristics of GPS Precipitable Water Vapor During Typical Heavy Rainfall Processes Under Different Synoptic Systems

YANG Luying¹, LIU Chang², YANG Chengfang², HAN Yongqing²

(1. Department of Science, Technology and Forecasting of Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract: Based on conventional ground observations and high-altitude radiosonde, hourly precipitation data of 123 automatic meteorological stations in Shandong Province and atmospheric precipitable water monitored by 25 ground-based GPS, the variation characteristics of atmospheric precipitable water vapor (P_{wv}) during typical heavy rain processes under different weather systems were analyzed. The results are as follows: (1) The time length of water vapor accumulation before the rain was closely related to the spatio-temporal scale of weather systems. Usually, the larger the weather system scale is, the longer the accumulation time is. The water vapor accumulation time before heavy rain for cold-front and trough type was about 26 hours and it was only 5-6 hours before the beginning of heavy rain on the edge of Western Pacific Subtropical High (WPSH). (2) The growth rate of P_{wv} was also closely related to weather system scale. The rate was less than $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ in front of cold-front heavy rain case and about $3.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ for the heavy rain on the edge of WPSH. (3) The water vapor accumulation time before the heavy rain was inversely related to the water vapor growth rate. When water vapor growth rate was more than $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, it took only 5-6 hours for water vapor accumulation before the heavy rain. (4) The beginning of heavy rain usually coincided with peak period of P_{wv} . The heavy rain on the edge of WPSH was associated with increasing of the water vapor accumulation, which was similar to the first stage of the heavy rain caused by cold shear line. The P_{wv} often decreases sharply after the rain. However, it increased after the rain on the edge of WPSH and during the first stage of the cold shear line type. After the second stage of the cold shear line heavy rain, the P_{wv} decreased slightly. Moreover, the P_{wv} increased a few hours after the rain again.

Key words: typical severe rainfall; precipitable water vapor; evolution characteristics; contrast analysis