

黄小玉,李月安,薛峰,等,2026.北京暴雨过程的高空比湿统计特征分析[J].气象,52(9):1033-1050. Huang X Y, Li Y A, Xue F, et al, 2026. Statistical characteristics of upper-air specific humidity during torrential rain events in Beijing[J]. Meteor Mon, 52(9):1033-1050(in Chinese).

北京暴雨过程的高空比湿统计特征分析^{*}

黄小玉¹ 李月安¹ 薛 峰¹ 孟宏欣¹ 欧小锋²
傅承浩³ 何锡汶¹ 姚 莉¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 湖南省气象科学研究所,长沙 410118

3 湖南省气象局,长沙 410118

提 要: 本文利用 08 时至次日 08 时(北京时,下同)24 h 地面降水资料,针对北京 2016—2023 年以来共计 83 个暴雨日,根据 500 hPa 位势高度场,将环流形势分为六类:蒙古低涡低槽型、副热带高压与西风槽型、河套低涡型、东北冷涡型、热带气旋(台风)型、西风槽与台风结合型。发现河套低涡型和热带气旋(台风)型容易出现大范围特大暴雨,东北冷涡型以局地暴雨为主,很少出现大范围暴雨。根据北京站 925、850、700、500、200 hPa 观测资料的统计分析,发现暴雨时段各层比湿显著高于非暴雨时段。进一步分析表明,在六类暴雨过程中,热带气旋(台风)型和河套低涡型的比湿值最大,这两类暴雨的降水强度与范围也最大。结合 1 h 降水资料,将高空观测时间(08 时、20 时)前后 1 h 降水量 ≥ 10 mm 定义为暴雨,0.1~9.9 mm 定义为小雨以及无降水三种情况,分别统计各层比湿发现,暴雨时段各层比湿最大,其次是小雨时段,最小的是无雨时段。结合急流分析了 8 个方向各层风对应的比湿特征,发现风向为 $90^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 有急流时比湿最大,风向在 $270^{\circ}\sim 315^{\circ}$ 有急流时比湿最小。本研究弥补了以往暴雨过程研究多关注 700 hPa 以下层次特别是 850 hPa 比湿特征而对高层分析欠缺的不足,发现 500 hPa 高度场的比湿增大对暴雨预报具有显著的指示作用。

关键词: 暴雨,分类,比湿特征

中图分类号: P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.060101

Statistical Characteristics of Upper-Air Specific Humidity During Torrential Rain Events in Beijing

HUANG Xiaoyu¹ LI Yue'an¹ XUE Feng¹ MENG Hongxin¹ OU Xiaofeng²
FU Chenghao³ HE Xiwen¹ YAO Li¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Hunan Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410118

3 Hunan Meteorological Service, Changsha 410118

Abstract: Based on the 24 h surface precipitation observation data from 08:00 BT to 08:00 BT of the next day and upper-air sounding data at 08:00 BT and 20:00 BT during 2016—2023 as well as ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), this paper identifies a total of 83 torrential rain days in Beijing during the study period. On this basis, Beijing torrential rain events are classified according to the synoptic situations at 500 hPa, and a statistical analysis is conducted on the specific humidity characteristics at 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa and 200 hPa during the torrential

^{*} 国家重点研发计划(2022YFC3002904)资助

2025 年 10 月 25 日收稿; 2026 年 5 月 27 日收修定稿

第一作者:黄小玉,主要从事天气预报业务和技术研究. E-mail: hxylyr@126.com

通讯作者:薛峰,主要从事预报技术及系统研究. E-mail: xuef@cma.gov.cn

rain days. The results are as follows. The torrential rain events in Beijing are divided into six types: torrential rain induced by Mongolian low vortex and trough type, subtropical high and westerly trough type, Hetao low-vortex type, northeast cold vortex type, tropical cyclone (typhoon) type, and westerly trough and typhoon type. The Hetao low-vortex type and tropical cyclone (typhoon) type tend to produce more extensive extreme torrential rains, while the northeast cold vortex type is dominated by localized torrential rain. In terms of specific humidity, it is markedly higher at all atmospheric levels during torrential rain periods than that during non-torrential rain periods. Among the six types of torrential rain events, tropical cyclone (typhoon) type and Hetao low-vortex type feature the highest specific humidity, which corresponds to the strongest precipitation intensity and the largest rainfall coverage of these two categories. Furthermore, based on hourly precipitation data, the precipitation conditions within one hour before and after the upper-air observation time (08:00 BT and 20:00 BT) are categorized into three grades: torrential rain (≥ 10 mm), light rain (0.1–9.9 mm) and no precipitation. The specific humidity is the highest at all levels during torrential rain period, followed by that in light rain period, and the lowest specific humidity is found in no precipitation period. In addition, the specific humidity of torrential rain events corresponding to winds from eight directions at different levels is statistically analyzed, and the results indicate that the specific humidity reaches its maximum when the wind direction ranges from 90° to 225° with jet streams, and drops to its minimum when the wind direction is between 270° and 315° accompanied by jet streams. Overall, this study has not only analyzed the specific humidity characteristics below 700 hPa during torrential rain events, but more specially found that the increase in specific humidity at 500 hPa can serve as a significant predictor for torrential rain forecasting.

Key words: torrential rain, classification, specific humidity characteristic

引 言

水汽是天气预报及气候预测的关键因子。对流层下部的水汽对降水影响很大,凝结过程是大气潜热传输的关键,也是降水的关键(Trenberth and Stepaniak, 2003a; 2003b);同时,水汽和温室气体对大气加热作用十分明显(Kiehl and Trenberth, 1997),对气候变化影响很大(Held and Soden, 2000)。

表征大气水汽含量的物理量有相对湿度、绝对湿度、露点温度和比湿等。其中,比湿是水汽与湿空气的质量之比。与绝对湿度相比,大气膨胀或收缩对比湿的影响不大,因此比湿是描述水汽含量的重要物理量。

水汽研究资料通常基于探空观测、卫星遥感和再分析资料。不同探测方法各有优缺点。再分析资料实时性差,对于短期预报作用不大;而探空具有历史序列长、垂直分辨率高、精度高的优点,是短期预报重要的参考资料。因此本文以探空资料分析北京暴雨过程高空的比湿分布及变化特征。

比湿长时间序列分析在气候分析研究较多。邹进上和刘惠兰(1981)、陆渝蓉和高国栋(1984)利用探空资料,分析了我国高空水汽含量及输送特征。翟盘茂和周琴芳(1997)研究了 1970—1990 年我国大气水分气候特征及变化趋势。McCarthy et al (2009)分析北半球比湿特征,指出除热带地区外,其他地区对流层中低层比湿呈上升趋势。Paltridge et al(2009)基于 NCEP 再分析资料发现北半球中低层湿度上升,而南半球正好相反。Dai et al(2011)分析得到全球对流层大气水汽呈增加趋势。郭艳君和丁一汇(2014)研究了我国高空比湿的气候学及演变特征。杨涛和杨莲梅(2021)分析了新疆高空大气比湿气候特征。以上分析和研究主要是集中在 700 hPa 及以下层次的分析,对对流层中层(500 hPa)比湿分析较少。

充足的水汽供应、强烈的上升运动和较长的持续时间是暴雨发生的三个条件。因此,水汽分析历来是气象工作者在暴雨分析预报中关注的重点,如张迎新等(2008)通过诊断分析,认为变性后“海马”存在两条水汽通道:一条伴随槽前的西南气流,一条来自南海并与强劲的偏南气流相伴。符娇兰等

(2019)分析了华北两次冷涡过程,指出水汽条件的差异导致降水落区、强度不同。姚秀萍等(2022)总结了我国三江源地区降水研究进展,指出水汽是影响降水的重要因子。王宇虹等(2015)针对2012年7月21日北京特大暴雨分析了水汽条件对降水落区和强度的显著影响。汪小康等(2022)对“21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征作了诊断分析。李武阶等(2007)研究了2004年梅雨期武汉上空对流层中低层水汽的演变及其与暴雨的关系。罗建英等(2009)分析了2004年7月广西汛期暴雨过程中的水汽和风场变化情况。辜旭赞等(2014)对一次南方持续暴雨过程的大尺度水汽场进行了模拟诊断。张万诚等(2014)总结了秋季水汽输送特征对云南降水的影响。许彬等(2019)对热带风暴造成的暴雨过程进行了水汽来源及输送特征分析。孔祥伟等(2021)对河西走廊干旱区的一次极端暴雨天气过程进行了水汽特征分析。陈红专等(2019)分析了湖南持续性暴雨天气过程的水汽输送与收支特征。高安春和申高航(2022)利用多源资料分析鲁西局地大暴雨成因及降水的微物理特征。李超等(2022)分析了河南“21·7”特大暴雨中水汽输送、收支和转化对局地强降水的影响。张晓茹等(2025)分析了贺兰山不同区域暴雨过程水汽输送特征。付智龙等(2025)对惠州前汛期暖区暴雨进行环流分型及环境参量统计分析。以上分析研究中,侧重于特定暴雨个例或者较短时期内暴雨的水汽特征分析,没有得到一些普适性强、有指导性的结论。

比湿是预报员重点关注的水汽因子。张芳华等(2022)分析北京“23·7”特大暴雨过程发现,925 hPa比湿一般为 $16\sim 18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,局地达 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上;郑婧等(2018)分析两次暴雨过程的比湿,850 hPa均超过 $14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;张家斌等(2016)分析一次冬季暴雨过程,850 hPa比湿大于 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;聂云等(2018)分析贵州一次梅雨锋暴雨过程,850 hPa比湿达 $18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。曾小团等(2007)、梁维亮等(2019)、叶朗明和苗峻峰(2014)对华南几次暴雨过程的研究也发现,850 hPa比湿均大于 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。包慧濛等(2021)分析了南方地区比湿特征及其与暴雨的关系,以850 hPa为例,25.5°N以南区域冬季暴雨日平均比湿为 $8.2\sim 9.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,春、秋季为 $11.2\sim 14.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,夏季为 $15.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右;25.5°N以北区域相应比湿分别为 $7.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右、 $9.0\sim 12.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $14.5\sim 15.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。以前研

究重点集中在700 hPa以下层次比湿分析,对于业务中常用的对流层中层(500 hPa)及对流层高层(200 hPa)研究很少。并且以上研究仅对几次过程的比湿进行分析,没有对多年暴雨过程的高空比湿进行总结,这些数值对考虑日常业务暴雨预报的水汽条件有一定的指示意义,但仍然比较笼统,没有精细反映高空不同层次比湿与暴雨的关系。

本文利用地面及高空观测资料,选取北京地区2016—2023年8年共计83 d暴雨日,按500 hPa形势进行环流分类,统计暴雨过程的不同月份、不同暴雨天气类型、不同降水类型、不同风向在不同高度层(925、850、700、500、200 hPa)比湿特征;不仅总结对流层中低层(925、850、700 hPa)比湿对暴雨预报的指示作用,而且发现对流层中层(500 hPa)比湿对暴雨预报指示作用同样十分重要。

1 资料和方法

1.1 资料

2014年开始,全国地面气象自动观测站开始大量布设,2016年北京区域站点布设密集。本研究选取2016—2023年地面观测站(包括国家站和区域站)、高空观测站资料。对以上资料进行了空间一致性、时间一致性及孤立点等质量控制,数据真实可靠。本研究定义北京地区08时至次日08时(北京时,下同)24 h降水量 $\geq 50\text{ mm}$ 的站次 ≥ 3 个,并且至少1个站1 h降水 $\geq 10\text{ mm}$ 为1个暴雨日,共计统计出83个暴雨日。选取降水时段高空观测各标准时次(北京时当日08时、20时、次日08时),以及暴雨开始前一日20时和暴雨结束当天20时北京站925、850、700、500、200 hPa观测资料统计比湿分布。

大部分暴雨过程是由一次或多次中小尺度天气系统造成的短时强降水引起,因此83个暴雨日中会有不同量级降水和无雨情况。为了进一步研究不同降水类型与高空比湿的关系,利用1 h降水资料,定义高空观测时间(08时、20时)前后1 h内区域内至少有1个站1 h降水量 $\geq 10\text{ mm}$ 为暴雨、 $0.1\sim 9.9\text{ mm}$ 为小雨以及无雨三种情况。期间共有无雨190个时次,小雨176个时次,暴雨159个时次。

1.2 方 法

利用探空资料各层的大气温度和温度露点差,根据式(1)计算出各气压层实际水汽压,然后利用式(2)计算各气压层比湿。

$$e = 6.1078 \exp \frac{a \times t_d}{273.16 + t_d - b} \quad (1)$$

式中: e 为水汽压(单位:hPa), t_d 为某高度上空气的露点温度(单位:℃); a 、 b 为常数,水面上 a 为 17.269, b 为 35.86,冰面上 a 为 21.874, b 为 7.6。

$$q = \frac{622e}{p - 0.378e} \quad (2)$$

式中: q 为空气比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), p 为某高度上的气压(单位:hPa)。

利用高空观测资料的 500 hPa 影响系统对北京暴雨进行分类,参考《北京天气预报手册》(季崇萍等,2020),对其中暴雨分类作了部分修改,将暴雨过程分为六类:蒙古低涡低槽型、副热带高压与西风槽型(以下简称副高与西风槽型)、河套低涡型、东北冷涡型、热带气旋(台风)型、西风槽与台风结合型。

2 研究结果分析

2.1 北京暴雨分类

83 个暴雨日分类如下:蒙古低涡低槽型暴雨共 29 d,是所有暴雨过程最多的类型,占比 35%。副高与西风槽型暴雨共 25 d,位居第二,占比 30%。河套低涡型暴雨共 8 d,大部分出现了大范围暴雨,占比 10%。东北冷涡型暴雨共 7 d,一般以局地降水为主,但对流强,占比 8%。热带气旋(台风)型暴雨共 6 d,日降水量大于 250 mm 的降水均出现在这类暴雨过程,占比 7%,全都出现了大范围暴雨过程。

西风槽与台风结合型暴雨共 8 d,占比 10%。北京暴雨分类占比见图 1。

83 个暴雨日中共有 24 d 出现了大范围暴雨过程(表 1)。其各类暴雨类型日数为:蒙古低涡低槽型 5 d(5/29)、副高与西风槽型 3 d(3/25)、河套低涡型 5 d(5/8)、东北冷涡型 1 d(1/7)、热带气旋(台风)型 6 d(6/6)、西风槽与台风结合型 4 d(4/8)。六类暴雨过程中热带气旋(台风)型暴雨日最多,其次是河套低涡型和蒙古低涡低槽型,东北冷涡型和副高与西风槽型出现大范围的暴雨过程较少。其中最强暴雨过程为 2023 年 7 月 29 日 08 时至 8 月 1 日 08 时[热带气旋(台风)型]和 2016 年 7 月 19 日 08 时至 21 日 08 时(河套低涡型)。六类暴雨的主要影响系统见表 2。

2.1.1 蒙古低涡低槽型

蒙古低涡低槽型暴雨中,北京位于涡前西南气流中,虽 500 hPa 水汽平流较弱,但配合中低层切变线、低空急流,以及地面辐合线等系统,有利于水汽动力抬升,使 500 hPa 水汽增加,导致降水在北京地区加强形成暴雨。如北京 2017 年 7 月 6 日 08 时至 7 日 08 时暴雨过程(图 2)。

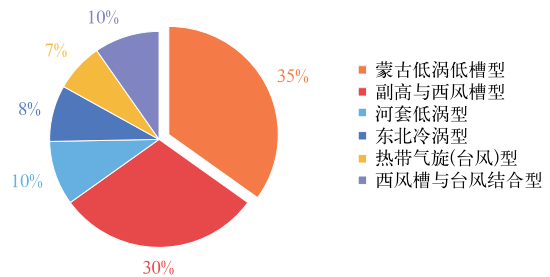


图 1 2016—2023 年北京暴雨分类占比
Fig. 1 Proportion of classification in torrential rain in Beijing from 2016 to 2023

表 1 2016—2023 年北京六类暴雨中出现 24 h 大范围暴雨的开始时间
Table 1 Start time of 24 h widespread torrential rain with six classifications of
torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023

蒙古低涡低槽型	副高与西风槽型	河套低涡型	东北冷涡型	热带气旋(台风)型	西风槽与台风结合型
2017-07-06-08	2017-08-22-08	2016-07-19-08	2021-06-25-08	2018-07-23-08	2017-08-02-08
2018-08-12-08	2018-08-05-08	2016-07-20-08		2018-07-24-08	2019-09-09-08
2019-07-22-08	2023-09-08-08	2019-08-04-08		2023-07-29-08	2022-07-03-08
2020-08-12-08		2021-07-11-08		2023-07-30-08	2022-07-05-08
2021-07-05-08		2021-07-12-08		2023-07-31-08	
				2023-08-01-08	

表 2 2016—2023 年北京六类暴雨的主要影响系统及水汽来源
Table 2 Key weather systems and moisture origins associated with six classifications
of torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023

暴雨类型	500 hPa 影响系统	700 hPa 影响系统	850 hPa 影响系统	地面影响系统	水汽来源
蒙古低涡低槽型	蒙古低涡和低槽	切变线、或有急流、低涡	切变线、或有急流、低涡	冷锋、或有中尺度辐合线、低压	南部、东部
副高与西风槽型	副高、低槽	切变线、或有急流、低涡	切变线、或有急流、低涡	冷锋、或有中尺度辐合线、低压	南部、东部
河套低涡型	河套低涡	切变线、或有急流、低涡	切变线、或有急流、低涡	冷锋、或有中尺度辐合线、低压	南部、东部
东北冷涡型	东北冷涡	切变线、或有急流、低涡	切变线、或有急流、低涡	冷锋、或有中尺度辐合线、低压	南部、东部
热带气旋(台风)型	台风低涡、倒槽	台风倒槽、或有东南急流	台风倒槽、或有东南急流	台风系统	东部
西风槽与台风结合型	北部西风槽、南部台风低涡及倒槽	切变线、或有急流、低涡	切变线、或有急流、低涡	冷锋、或有中尺度辐合线、低压	东部、南部

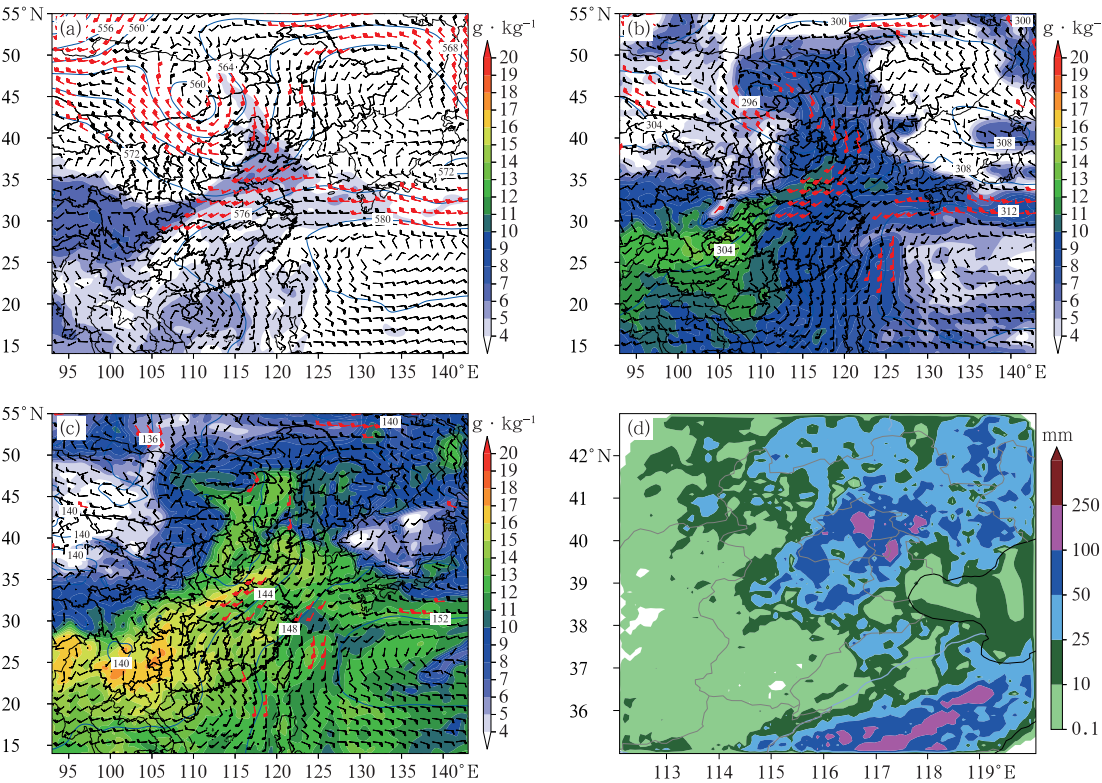


图 2 2017 年 7 月 6 日 20 时(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)、风场(风羽)、比湿场(填色);(d)6 日 08 时至 7 日 08 时降水量

Fig. 2 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 20:00 BT 6 July, and (d) precipitation from 08:00 BT 6 to 08:00 BT 7 July 2017

2.1.2 副高与西风槽型

这类暴雨过程,北京位于稳定少动副高边缘东侧,水汽输送条件十分有利;西风槽(或低涡)东移影响北京,触发降水。如 2017 年 8 月 22—23 日暴雨

过程(图 3)。

2.1.3 河套低涡型

北京受 500 hPa、700 hPa(或 850 hPa)低涡前大尺度低空急流、切变线影响,有利于水汽输送,形

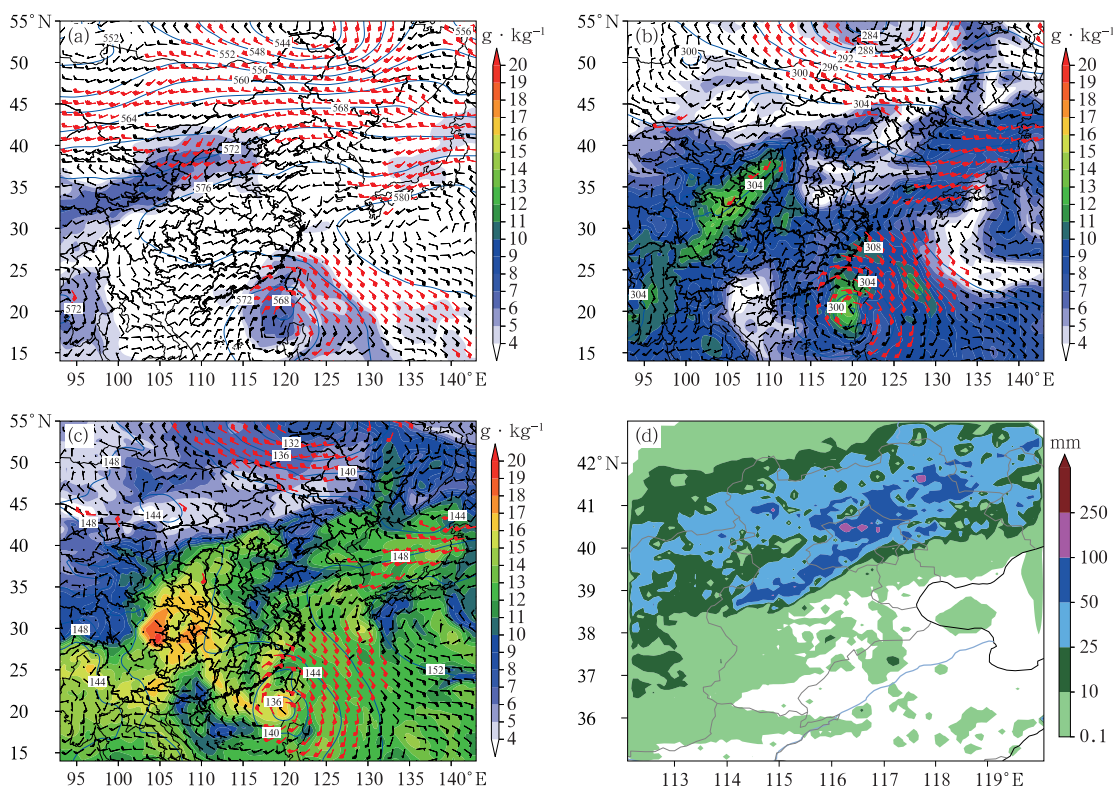


图 3 2017 年 8 月 22 日 08 时(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)、风场(风羽)、比湿场(填色);(d)22 日 08 时至 23 日 08 时降水量

Fig. 3 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at

08:00 BT 22 August, and (d) precipitation from 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23 August 2017

成大范围连续性暴雨过程。如 2016 年 7 月 19—21 日出现了 2 天大范围大暴雨(图 4)。

2.1.4 东北冷涡型

这类暴雨过程,北京地区通常受 500 hPa 东北冷涡后部西北气流控制,水汽平流输送弱。但中低层受切变线及低空急流影响,500 hPa 水汽主要以动力抬升为主,也会造成区域性暴雨。如 2021 年 6 月 25—26 日暴雨过程(图 5)。

2.1.5 热带气旋(台风)型

北京地区受台风残涡东南急流与副高边缘偏南风的影响,水汽条件很好。北京西部受迎风坡地形影响容易出现大范围特大暴雨。如 2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日北京出现了大范围特大暴雨(图 6)。

2.1.6 西风槽与台风结合型

西风槽与台风倒槽相连,弱冷空气自浅槽底部渗入,两者共同影响北京地区,形成暴雨过程。如

2017 年 8 月 2—3 日暴雨过程(图 7)。

2.2 高空比湿分析

2.2.1 总体比湿特征

2016—2023 年北京地区所有暴雨过程及大范围暴雨过程从低层到高层总体比湿明显下降(图 8),比湿大值区主要集中在对流层中下层,200 hPa 比湿很小。500、700、850、925 hPa 比湿均是大范围暴雨过程明显大于所有暴雨过程。大范围暴雨过程五层比湿中位数分别为 0.04、4.10、8.67、13.74、15.93 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,所有暴雨过程五层比湿中位数分别为 0.02、2.13、7.08、11.86、14.15 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;在预报员重点关注的 700 hPa 以下层次,大范围暴雨过程与所有暴雨过程比湿有所差异,但在 500 hPa 两者之间的差异更明显(分别为 4.10 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、2.13 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),前者接近后者的两倍,说明持续大范围的强降水不仅对流层低层比湿比较大,对流层中层比湿

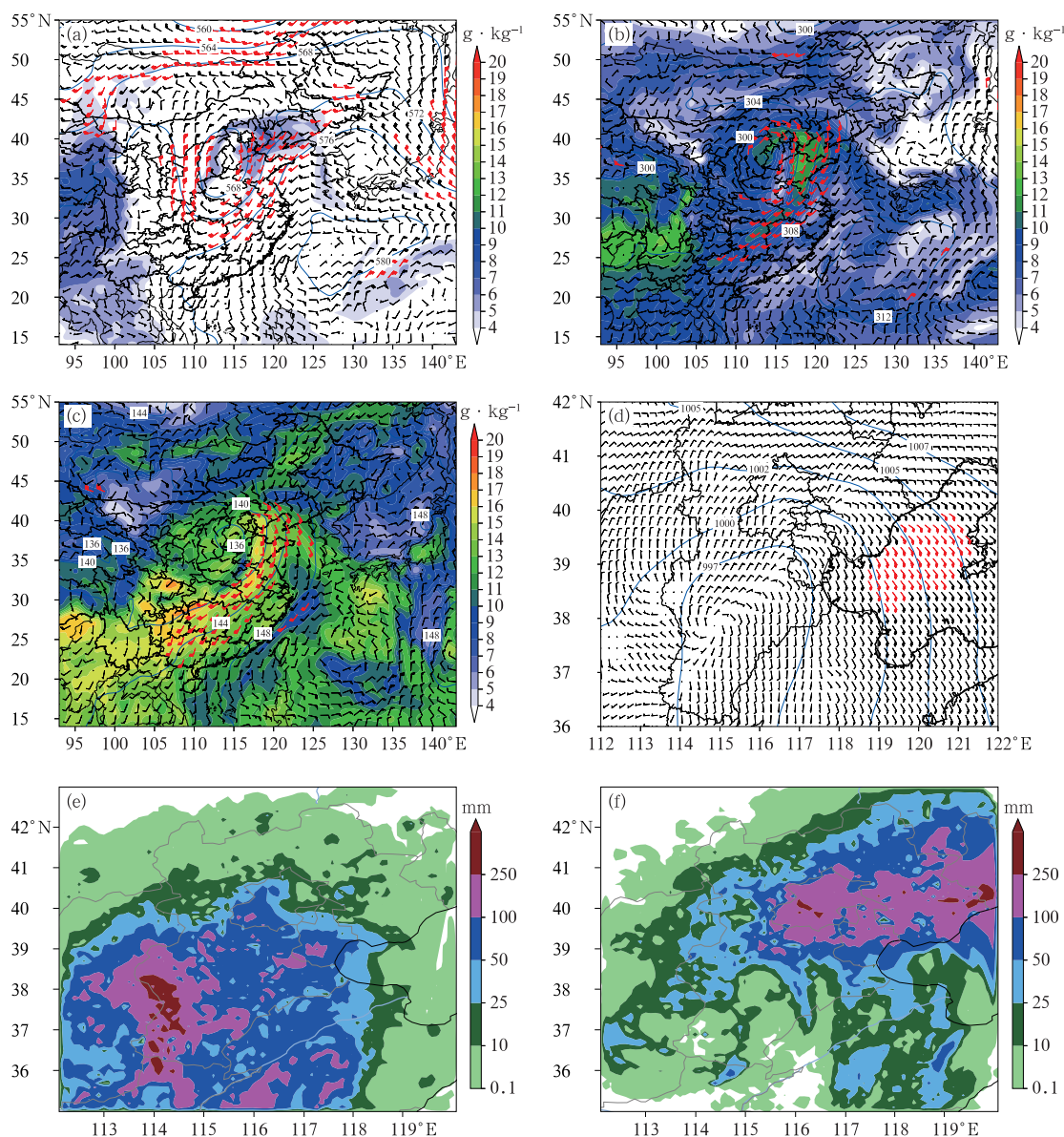


图4 2016年7月20日20时(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa 高度场(等值线,单位: dagpm)、风场(风羽)、比湿场(填色),(d)地面风场(风羽)和气压场(等值线,单位: hPa);
(e)19日08时至20日08时和(f)20日08时至21日08时降水量

Fig. 4 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa, (d) surface wind field (barb) and pressure field (contour, unit: hPa) at 20:00 BT 20 July, and (e, f) precipitation from (e) 08:00 BT 19 to 08:00 BT 20 and (f) 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 July 2016

也需要满足比较大的条件。

在2016—2023年所有暴雨过程中,暴雨时段(暴雨开始当日08时、20时,暴雨结束日08时)与非暴雨时段(暴雨开始前一日20时,暴雨结束日20时)相比,除200 hPa外,各层比湿前者明显大于后者(图9)。暴雨时段各层比湿(200、500、700、

850、925 hPa)中位数分别为0.02、2.60、7.28、12.33、14.60 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;非暴雨时段各层比湿中位数分别为0.02、1.04、6.23、10.41、13.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。500 hPa比湿暴雨时段是非暴雨时段的2.5倍。说明比湿与暴雨过程具有很好的正相关性,500 hPa比湿对暴雨形成具有重要作用。

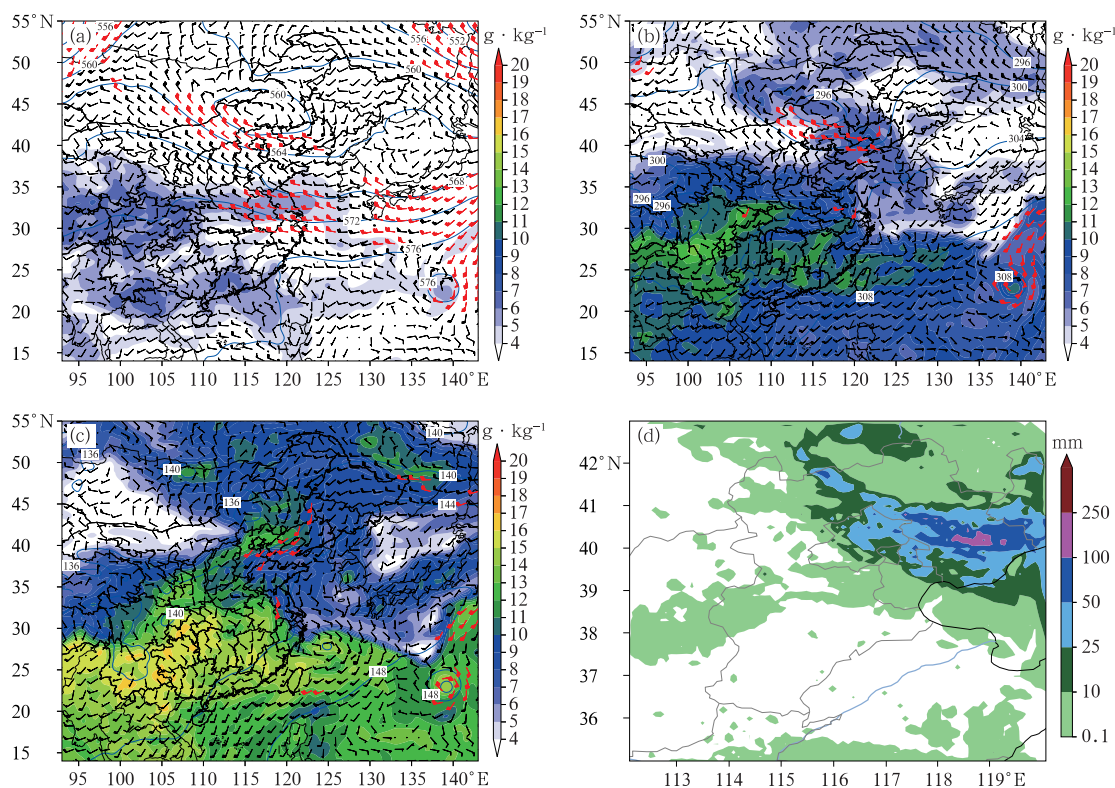


图 5 2021 年 6 月 25 日 20 时(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)、风场(风羽)、比湿场(填色);(d)25 日 08 时至 26 日 08 时降水量

Fig. 5 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 20:00 BT 25 June, and (d) precipitation from 08:00 BT 25 to 08:00 BT 26 June 2021

2.2.2 不同月份暴雨比湿特征

北京 2016—2023 年 5—9 月均有暴雨过程出现,分析各月暴雨过程各层比湿(图 10),7 月最大,5 月最小,对应 24 次大范围暴雨过程中 7 月出现了 14 次,8 月 7 次,9 月 2 次,6 月 1 次,北京暴雨过程主要出现在 7 月,其次是 8 月。表 3 是 5—9 月暴雨过程各层比湿中位数,5 月 200 hPa、700 hPa,6 月 500 hPa、700 hPa,9 月 200 hPa 暴雨时段比非暴雨时段略小;8 月样本较多,700 hPa、925 hPa 非暴雨时段稍大于暴雨时段的比湿,7 月暴雨时段各层比湿大部分大于非暴雨时段;低层比湿(925 hPa、700 hPa)两者差值不明显,但 500 hPa 除 6 月外,其他几个月差值明显,7 月 500 hPa 暴雨时段比湿是其他非暴雨时段 500 hPa 比湿的 2~6 倍,不同月份的数值表明 500 hPa 比湿也是暴雨预报需重点关注的因子。

2.2.3 不同暴雨类型比湿特征

不同类型暴雨(图 11 和表 4),各层比湿排序分别是热带气旋(台风)型、河套低涡型、西风槽与台风结合型、蒙古低涡低槽型、副高与西风槽型、东北冷涡型。热带气旋(台风)型各层比湿均最大并且集中,500 hPa 暴雨时段比湿中位数达 $5.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,远大于其他类型;西风带暴雨过程中河套低涡型暴雨过程降水最大,虽然其 850 hPa、925 hPa 的比湿均小于西风槽与台风结合型暴雨过程,但 700 hPa、500 hPa 的比湿大于后者,再次证明低层比湿大于一定的阈值后,对流层中层 700 hPa、500 hPa,尤其是 500 hPa 比湿是预报暴雨水汽条件的关键因素。蒙古低涡低槽型、副高与西风槽型这两种类型各层比湿基本相当。东北冷涡型暴雨各层比湿最小,很难出现大范围暴雨过程。

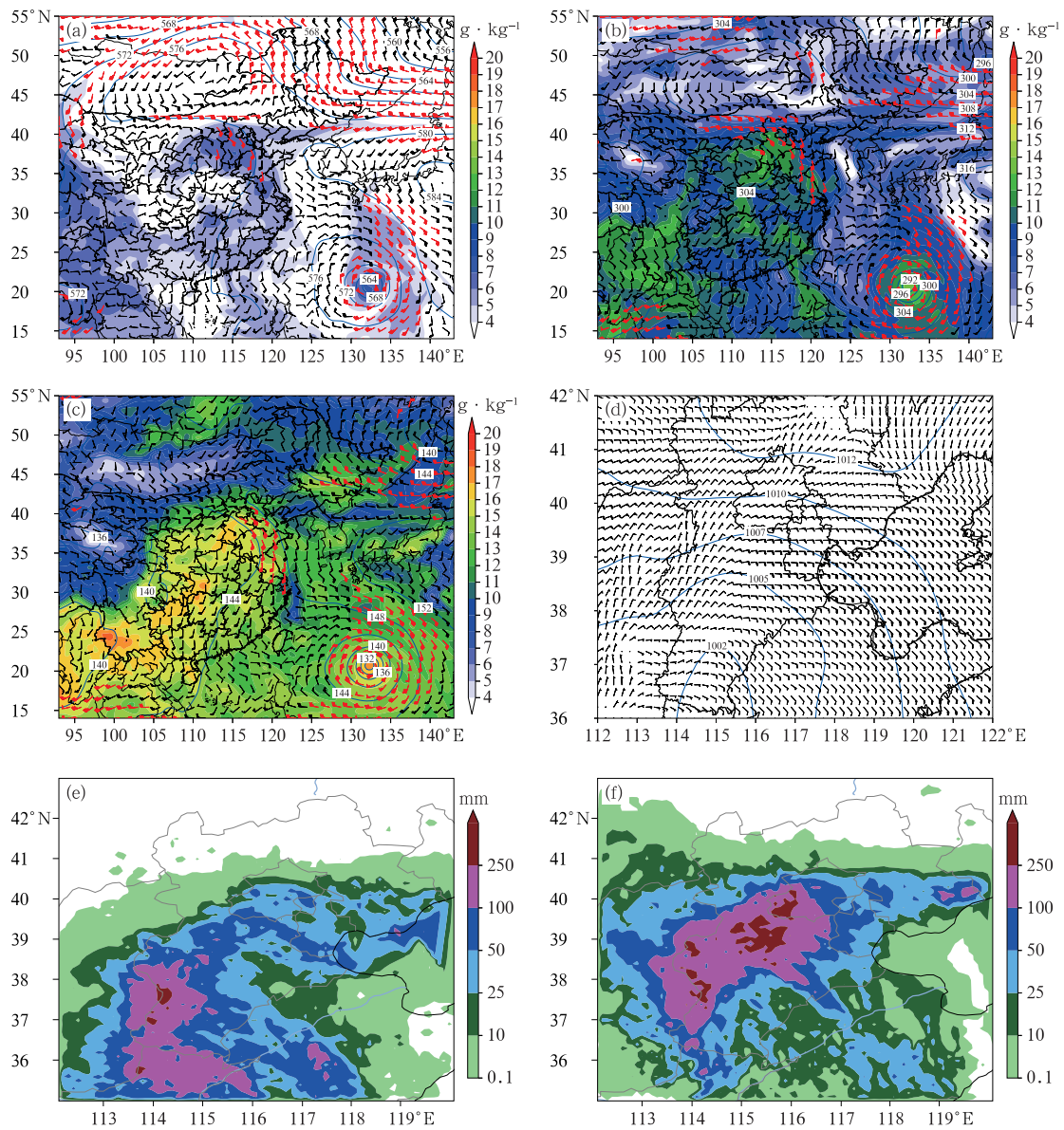


图 6 2023 年 7 月 30 日 20 时(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)、风场(风羽)、比湿场(填色),(d)地面风场(风羽)和气压场(等值线,单位:hPa);
(e)29 日 08 时至 30 日 08 时和(f)30 日 08 时至 31 日 08 时降水量
Fig. 6 The geopotential height field (contour, unit; dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa, (d) surface wind field (barb) and pressure field (contour, unit; hPa) at 20:00 BT 30 July, and (e, f) precipitation from (e) 08:00 BT 29 to 08:00 BT 30 and (f) 08:00 BT 30 to 08:00 BT 31 July 2023

2.2.4 不同降水量级比湿特征

为了进一步研究不同降水类型与高空比湿的关系,根据前文对暴雨、小雨、无雨定义,统计了三类情况的比湿特征。三类天气中暴雨时段各层比湿最

大,其次是小雨时段,最小的是无雨时段。在同种降水类型中,大范围暴雨过程的比湿大于所有暴雨过程的比湿。三种天气中虽然 850 hPa、925 hPa 比湿仍然是暴雨最大,无雨最小,但无雨、小雨比湿也比

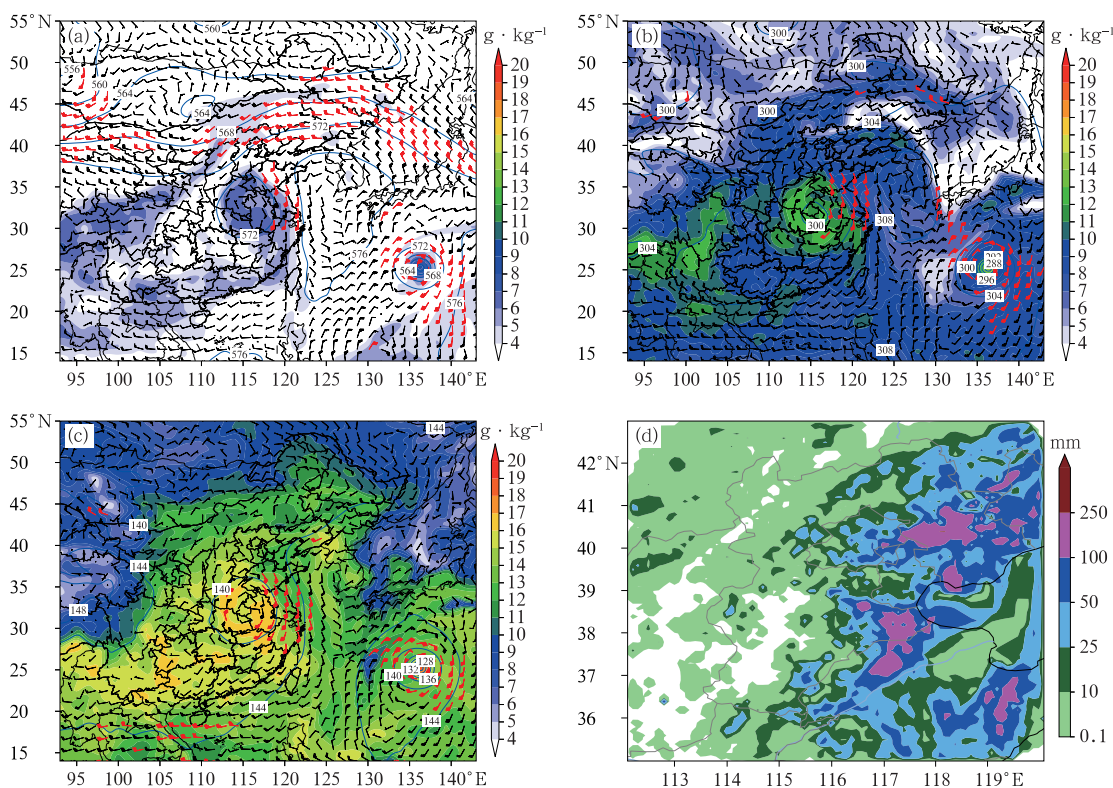
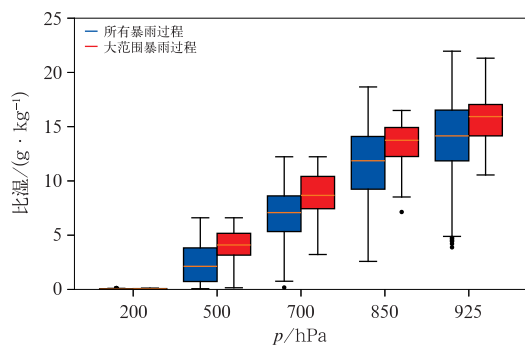


图 7 2017 年 8 月 2 日 08 时 (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、风场 (风羽)、比湿场 (填色); (d) 2 日 08 时至 3 日 08 时降水量

Fig. 7 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 08:00 BT 2 August, and (d) precipitation from 08:00 BT 2 to 08:00 BT 3 August 2017



注: 箱线图中触须的上端和下端分别代表统计最大值和最小值, 箱体三条线自下而上分别代表第 25%、50%、75% 分位值; 圆点为孤立点; 下同。

图 8 2016—2023 年北京所有暴雨过程及大范围暴雨过程各层比湿分布

Fig. 8 Distribution of specific humidity at various levels for all torrential rain events and widespread torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023

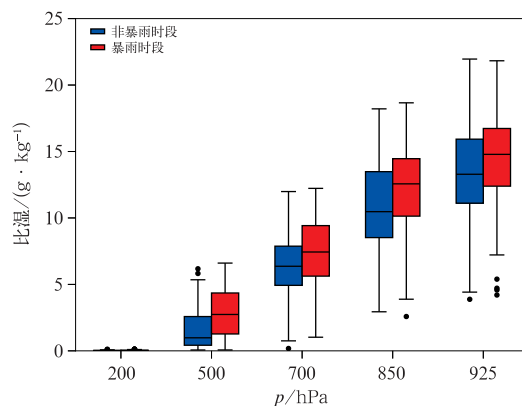


图 9 2016—2023 年北京所有暴雨过程暴雨时段及非暴雨时段各层比湿分布

Fig. 9 Distribution of specific humidity at various levels during torrential rain periods and non-torrential rain periods for all torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023

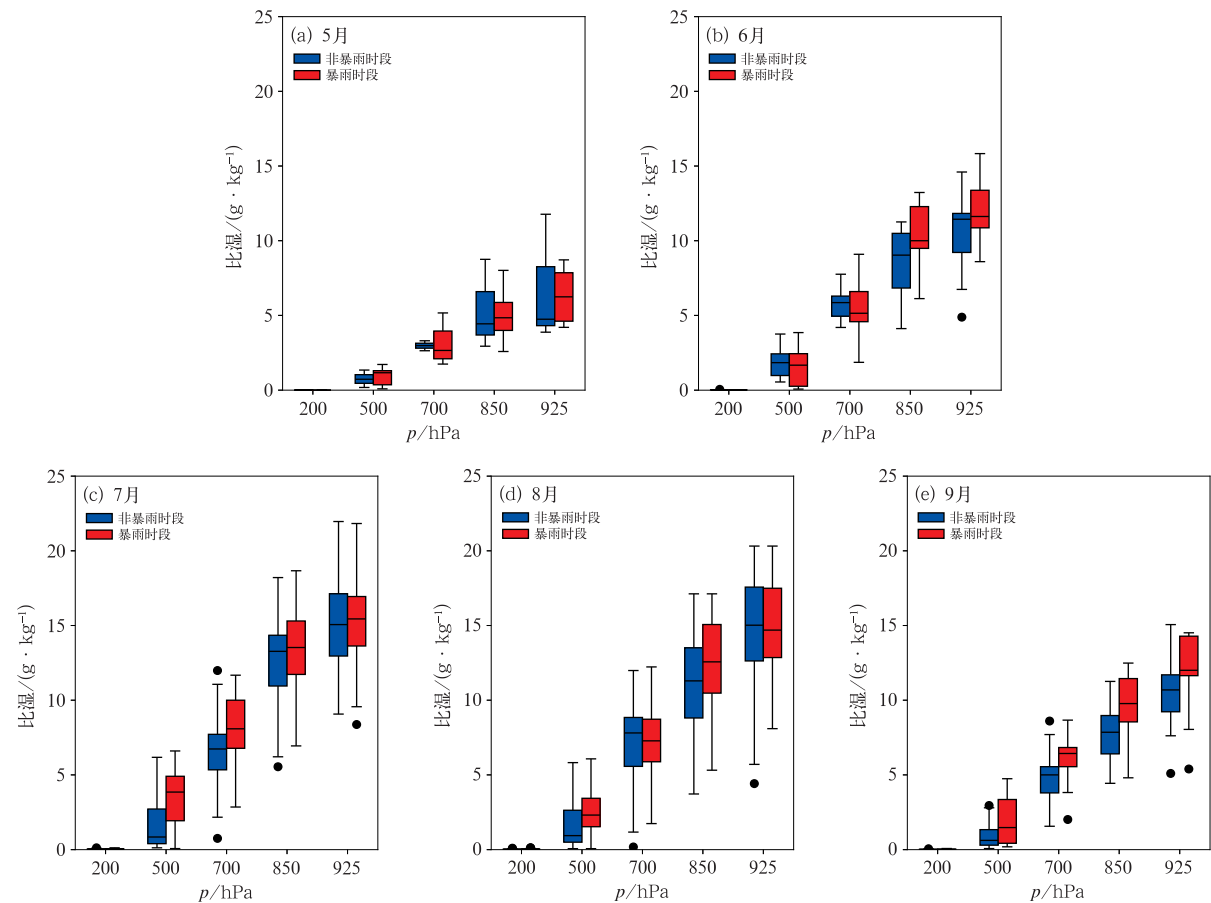


图 10 2016—2023 年 5—9 月北京所有暴雨过程暴雨时段及非暴雨时段各层比湿分布
Fig. 10 Distribution of specific humidity at various levels during torrential rain periods and non-torrential rain periods for all torrential rain events in Beijing during May—September from 2016 to 2023

表 3 2016—2023 年 5—9 月北京所有暴雨过程暴雨时段及非暴雨时段各层比湿中位数(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 3 Median specific humidity at various levels during torrential rain periods and non-torrential rain periods for all torrential rain events in Beijing during May—September from 2016 to 2023 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

月份	是否暴雨时段	200 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa
5	是	0	1.16	2.66	4.84	6.25
	否	0.01	0.73	2.98	4.44	4.75
6	是	0.02	1.67	5.15	10.0	11.62
	否	0.02	1.84	5.86	9.03	11.44
7	是	0.03	3.85	8.09	13.53	15.44
	否	0.02	0.84	6.74	12.27	15.06
8	是	0.03	2.31	7.28	12.57	14.69
	否	0.02	0.94	7.81	11.3	15.02
9	是	0.01	1.48	6.43	9.77	12.00
	否	0.02	0.62	5.00	7.86	10.69

较大,中位数均分别大于 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。500 hPa 比湿无雨时明显小于小雨与暴雨,所有暴雨过程为 $3.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,大范围暴雨过程为 $5.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 5 和图 12)。六类暴雨过程也有类似结论(图略)。

将 83 个暴雨日所有时次分成无雨、小雨、暴雨时序点,绘制三类降水 500、700、850、925 hPa 的比湿时序图(图 13),各层总体比湿均是暴雨最大,小雨其次,无雨最小。

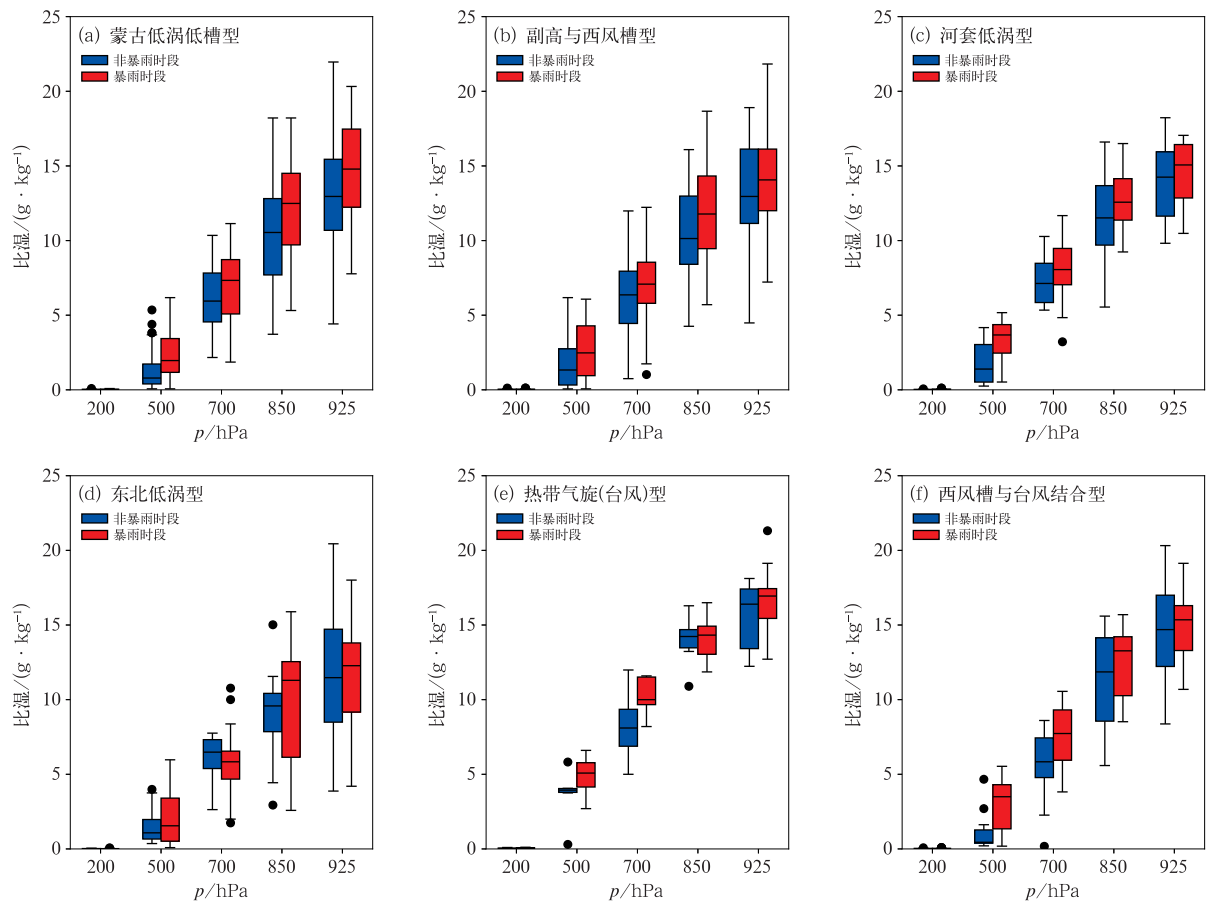


图 11 2016—2023 年北京不同类型暴雨各层比湿分布

Fig. 11 Distribution of specific humidity at various levels for different types of torrential rain in Beijing from 2016 to 2023

表 4 2016—2023 年北京不同类型暴雨各层比湿中位数(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 4 Median specific humidity at various levels for different types of torrential rain in Beijing from 2016 to 2023 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

暴雨类型	是否暴雨时段	200 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa
蒙古低涡低槽型	是	0.03	1.96	7.33	12.49	14.78
	否	0.02	0.79	5.95	10.54	12.96
副高与西风槽型	是	0.02	2.48	7.08	11.78	14.06
	否	0.02	1.33	6.36	10.14	12.96
河套低涡型	是	0.03	3.68	8.06	12.57	15.06
	否	0.02	1.40	7.13	11.52	14.25
东北冷涡型	是	0.01	1.55	5.84	11.29	12.27
	否	0.01	1.08	6.49	9.58	11.48
热带气旋(台风)型	是	0.06	5.08	10.0	14.32	16.94
	否	0.03	3.94	8.10	14.23	16.40
西风槽与台风结合型	是	0.02	3.50	7.73	13.27	15.35
	否	0.02	0.45	5.84	11.86	14.69

2.2.5 不同风向比湿特征

风是大气运动的结果,可体现空气中能量、动量、物质和各种物理量等输送情况。将风向分成 8 个方向($0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 90^\circ$ 、 $90^\circ \sim 135^\circ$ 、 $135^\circ \sim 180^\circ$ 、

$180^\circ \sim 225^\circ$ 、 $225^\circ \sim 270^\circ$ 、 $270^\circ \sim 315^\circ$ 、 $315^\circ \sim 360^\circ$), 分别表示北东北(NNE)、东东北(ENE)、东东南(ESE)、南东南(SSE)、南西南(SSW)、西西南(WSW)、西西北(WNW)、北西北(NNW)风,定义

表 5 2016—2023 年北京暴雨过程不同降水量级各层比湿中位数(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 5 Median specific humidity for different precipitation intensities at various levels during torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

降水量级	降水范围	200 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa
无雨	所有暴雨过程	0.02	0.93	5.59	10.27	13.29
	大范围暴雨过程	0.02	1.82	5.59	12.57	15.16
小雨	所有暴雨过程	0.02	2.76	7.44	11.90	13.89
	大范围暴雨过程	0.03	3.97	8.52	13.57	16.08
暴雨	所有暴雨过程	0.05	3.85	8.73	13.92	15.44
	大范围暴雨过程	0.06	5.08	10.21	14.78	16.43

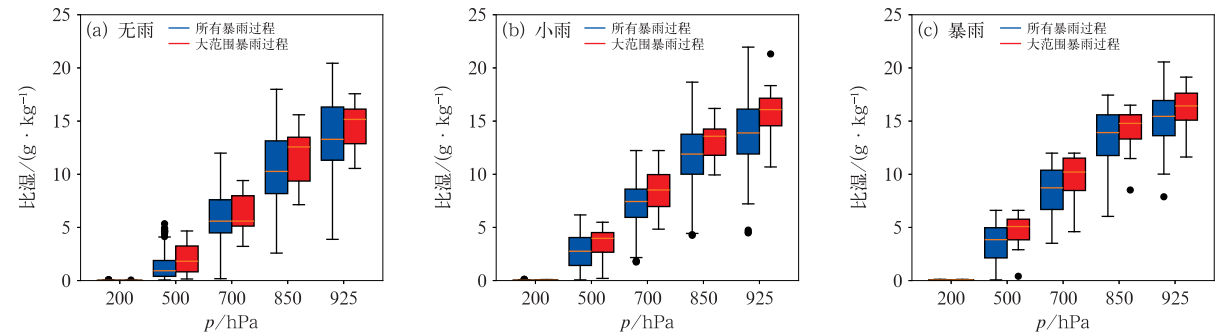
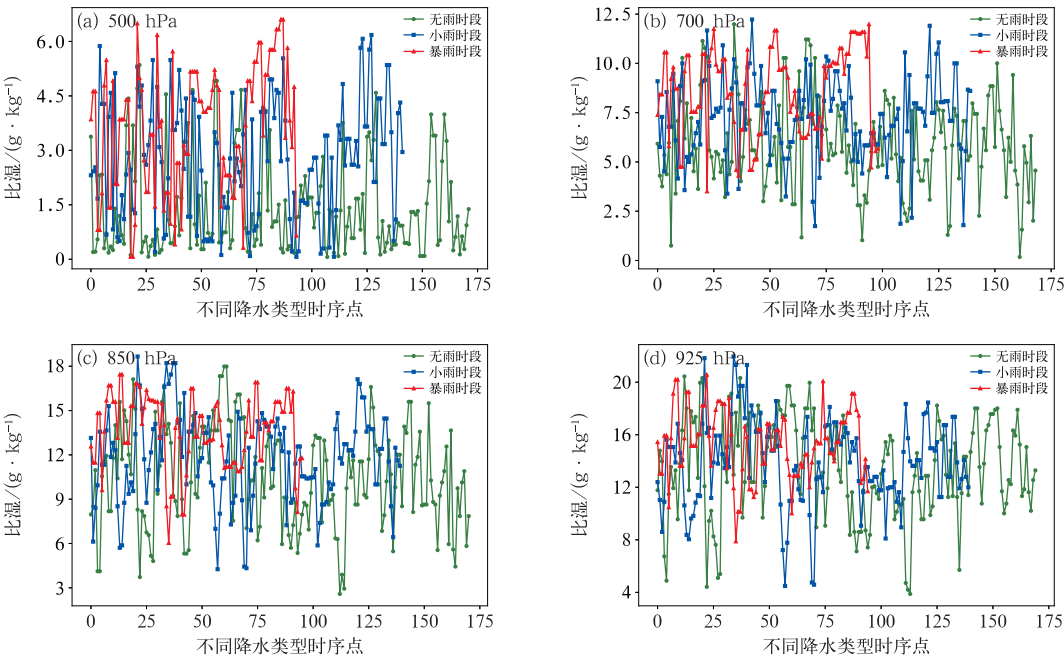


图 12 2016—2023 年北京暴雨过程不同降水量级各层比湿分布

Fig. 12 Distribution of specific humidity for different precipitation intensities at various levels during torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023



注:横坐标是暴雨、小雨、无雨按时间先后排序的时序。

图 13 2016—2023 年北京暴雨、小雨、无雨 500、700、850、925 hPa 比湿时序图

Fig. 13 Time-series of specific humidity at 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa and 925 hPa for torrential rain, light rain and no rain in Beijing from 2016 to 2023

风速 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为急流。各层比湿分布见图 14 和表 6, $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ (东南、西南风)各层比湿最大,有急流时的比湿大部分情况大于无急流时的比湿。925 hPa 最大比湿中位数为 $19.55\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,出现在风向 $180^{\circ}\sim 225^{\circ}$,其次是风向为 $135^{\circ}\sim 180^{\circ}$,均为有急流时;出现东南急流时(风向为 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$),各层比湿较相同区间有急流时的比湿明显偏大,这种情

况一般是台风形成的急流,水汽含量丰富。 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 各层出现急流较少,500 hPa 在 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向有较大的比湿,有无急流中位数分别为 $6.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $4.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。风向为 $270^{\circ}\sim 315^{\circ}$ 、 $315^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 时各层比湿均明显下降,有急流时比湿较无急流时更小,因为西北风为干冷空气,风速越大,水汽越小。

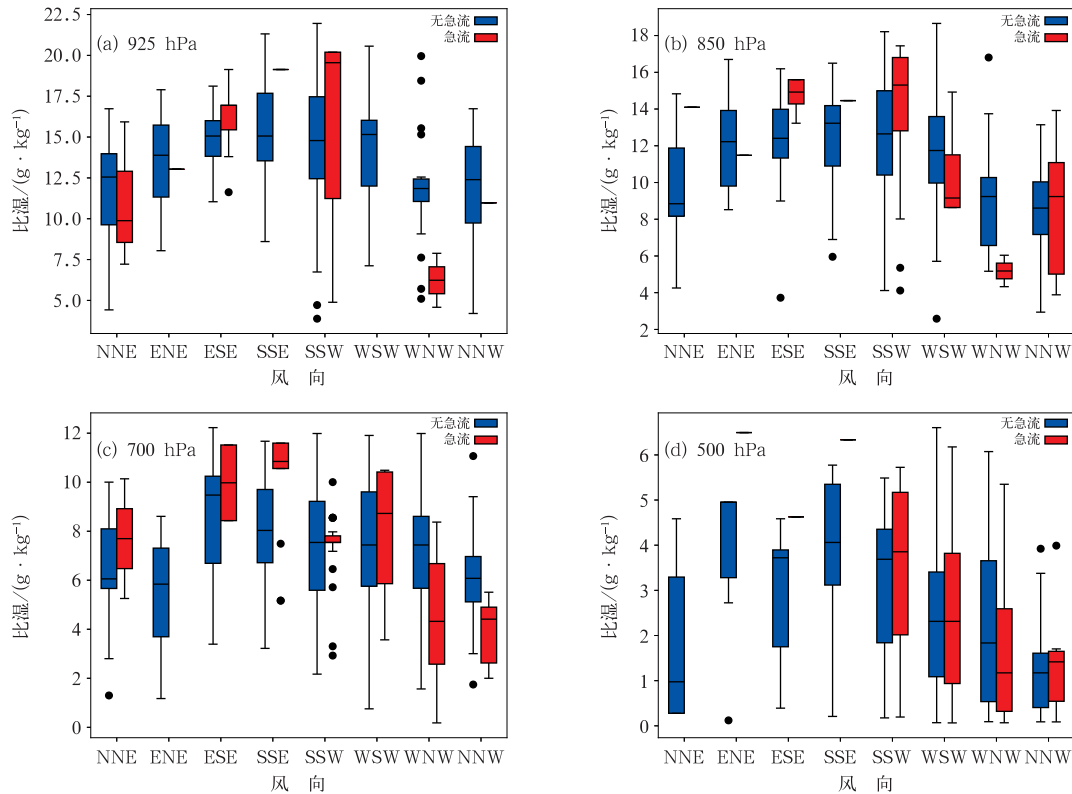


图 14 2016—2023 年北京不同风向 925、850、700、500 hPa 有、无急流时比湿分布

Fig. 14 Distribution of specific humidity with or without jet stream at 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa and 500 hPa for different wind directions in Beijing from 2016 to 2023

表 6 2016—2023 年北京不同风向有、无急流比湿中位数(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 6 Median specific humidity with or without jet stream under different wind directions in Beijing from 2016 to 2023 (unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

层次/hPa	有、无急流	$0^{\circ}\sim 45^{\circ}$	$45^{\circ}\sim 90^{\circ}$	$90^{\circ}\sim 135^{\circ}$	$135^{\circ}\sim 180^{\circ}$	$180^{\circ}\sim 225^{\circ}$	$225^{\circ}\sim 270^{\circ}$	$270^{\circ}\sim 315^{\circ}$	$315^{\circ}\sim 360^{\circ}$
925	有	9.88	13.04	16.94	19.13	19.55	/	6.23	10.97
	无	12.55	13.89	15.06	15.06	14.78	15.16	11.85	12.39
850	有	14.10	11.48	14.92	14.46	15.30	9.16	5.18	9.24
	无	8.84	12.22	12.41	13.23	12.65	11.74	9.24	8.61
700	有	7.70	/	9.97	10.85	7.54	8.73	4.32	4.41
	无	6.06	5.84	9.47	8.03	7.54	7.44	7.44	6.08
500	有	/	6.49	4.62	6.33	3.85	2.31	1.17	1.42
	无	0.97	4.95	3.72	4.06	3.69	2.31	1.84	1.17

注:“/”表示无数据。

为了更好地理解不同类型暴雨及大范围暴雨各层比湿特征,表 7 列出了北京六类暴雨及大范围暴雨各层比湿 25%~75%分位数,可以给北京地区暴雨预报提供更加清晰的参考。

2.2.6 比湿统计显著性水平检验

对 83 个暴雨日的暴雨时段与非暴雨时段、大范围暴雨与非大范围暴雨比湿进行 t 值显著性水平检验(表 8,表 9)。除 200 hPa 外,其他层次均通过了显著性水平检验。说明中低层水汽含量对暴雨影响更直接。效应量对比:暴雨时段效应量:850 hPa 效

应最强($t=5.58$);大范围暴雨效应量:700 hPa 效应最强($t=9.45$)。所有显著检验的 P 值均远小于 0.01,表明结果具有高统计功效,可排除随机波动影响。六类暴雨的暴雨时段与非暴雨时段只有热带气旋(台风)型 200 hPa、热带气旋(台风)型 500 hPa、河套低涡型 500 hPa 比湿通过了 P 值为 0.05 的显著性水平检验,其他均未能通过。六类暴雨大范围暴雨与非大范围暴雨没有通过显著性水平检验。这可能是因为分类后样本过少导致的,但依然反映了不同天气背景下的物理量配置趋势,可供业务参考。

表 7 2016—2023 年北京不同类型暴雨高空比湿特征参考表(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 7 Reference table of high-altitude specific humidity characteristics for different types of torrential rain in Beijing from 2016 to 2023 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

层次/hPa	蒙古低涡低槽型	副高与西风槽型	河套低涡型	东北冷涡型	热带气旋(台风)型	西风槽与台风结合型	大范围暴雨
925	12.24~17.47	12.00~16.03	12.85~16.43	9.17~13.80	15.44~17.44	13.29~16.30	14.15~17.04
850	9.71~4.51	9.46~4.32	11.37~14.15	6.14~12.55	13.04~14.92	10.27~14.21	12.25~14.92
700	5.08~8.73	5.80~7.08	7.05~9.47	4.69~6.55	9.67~11.52	5.95~9.31	7.44~10.42
500	1.17~3.44	0.95~4.29	2.16~4.37	0.52~3.41	4.16~5.77	1.35~4.30	3.16~5.17
200	0.01~0.05	0.01~0.05	0.02~0.05	0~0.02	0.04~0.08	0.01~0.03	0.02~0.08

注:区间表示 25%~75%分位数。

表 8 2016—2023 年北京所有暴雨过程暴雨时段与非暴雨时段比湿显著性水平检验结果

Table 8 Significance level tests during torrential rain periods and non-torrential rain periods for all torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023

层次/hPa	暴雨时段样本数/个	非暴雨时段样本数/个	暴雨时段 t 值	暴雨时段 P 值	显著性
925	384	143	3.42	0.000666	显著
850	386	143	5.59	3.92×10^{-8}	显著
700	388	142	4.92	1.13×10^{-6}	显著
500	386	146	8.76	2.55×10^{-17}	显著
200	373	143	0.12	0.903	不显著

表 9 2016—2023 年北京大范围暴雨与非大范围暴雨比湿显著性水平检验结果

Table 9 Significance level tests for widespread torrential rain and non-widespread torrential rain in Beijing from 2016 to 2023

层次/hPa	大范围暴雨样本数/个	非大范围样本数/个	大范围 t 值	大范围 P 值	显著性
925	128	399	5.91	6.33×10^{-9}	显著
850	128	401	7.02	6.82×10^{-12}	显著
700	130	400	9.45	1.08×10^{-19}	显著
500	135	397	7.23	1.75×10^{-12}	显著
200	124	392	-1.13	0.26	不显著

3 讨 论

3.1 不同类型暴雨 500 hPa 比湿不同的原因

高空水汽大小主要取决两个因素,一个是平流作用将水汽从源地输送到暴雨区,另一个是垂直上升运动将低层水汽带到上空。500 hPa 高度超过 5000 m,

一般情况水汽含量少、比湿小,但在有利天气形势下,通过平流与上升运动,比湿也会明显增加。

热带气旋(台风)型暴雨由于从地面至 500 hPa 北京地区上空均为一致的东南风,风速常大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,各层均有利于水汽从南面、东面输送,台风低涡及倒槽也有利于水汽辐合上升。此类暴雨 500 hPa 的水汽不仅仅是动力上升输送,平流水汽输送也很关键,因此比湿最大,暴雨时段比湿中位数

达 $5.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。如 2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日受台风“杜苏芮”残涡、副高、台风“卡努”共同影响,北京从低层到高层长时间维持东南急流,不断有水汽从我国东部海域往北京输送,低层在低涡附近有强烈的上升运动和地形抬升运动,500 hPa 的比湿中位数大于 $5.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

河套低涡型暴雨北京地区上空 850~500 hPa 受低涡前西南气流或东南气流控制,700 hPa 及以下层次常伴有低空急流和切变线,500 hPa 水汽主要来自低层动力抬升和平流输送,但较热带气旋(台风)型暴雨相对较弱,暴雨时段比湿中位数达 $3.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

西风槽与台风结合型、蒙古低涡低槽型、副高与西风槽型这三类暴雨过程,500 hPa 水汽平流与动力抬升作用较前两类暴雨小,因此 500 hPa 比湿也较小。

东北低涡型暴雨,北京 500 hPa 为西北风,平流作用为负,水汽主要来自低层的动力抬升作用,因此比湿最小。

3.2 500 hPa 比湿是暴雨预报关键指示因子的原因

当中低层比湿满足暴雨阈值的前提下,500 hPa 比湿增加,表明大气湿层深厚,整层水汽充沛、大气可降水量增大,且大气层结更趋于不稳定,为持续性、高效率的降水提供了更有利的条件。所有暴雨过程、不同月份暴雨过程、六类暴雨过程,不同降水量级(暴雨、小雨、无雨)各层比湿均有类似结果,在低层(如 850 hPa)水汽条件已满足(例如比湿 $> 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的情况下,500 hPa 的比湿就成为区分“一般性雷阵雨”与“致灾性大范围暴雨”关键,因此在预报业务工作中,不仅要关注中低层比湿的大小,500 hPa 比湿增大对暴雨有更好的指导作用,整层湿度增加更有利暴雨形成与维持。

3.3 500 hPa 比湿在业务中应用注意事项

目前预报业务是以数值预报产品为基础,充分发挥预报员的作用,对数值预报产品进行订正。本文结论是基于高空探测资料的比湿结果。因此要对数值模式产品与探空实况进行对比分析,如果模式预报的 500 hPa 比湿较实况明显偏低,可能存在漏报大范围暴雨的风险;如果模式预报的 500 hPa 比湿较实况明显偏大,则会出现暴雨空报风险。

4 结 论

本文利用 2016—2023 年 08 时至次日 08 时 24 h、1 h 降水资料和高空观测资料,统计了北京 8 年暴雨过程,并根据 500 hPa 主要影响系统对暴雨过程进行分类,统计分析不同月份、不同暴雨过程类型、不同降水量级、不同风向高空比湿特征,结论如下:

(1)根据 500 hPa 环流形势,北京暴雨分为六类,按比湿从大到小依次为:热带气旋(台风)型、河套低涡型、副高与西风槽结合型、蒙古低涡低槽型、副高与西风槽结合型、东北低涡型。前两类比湿大,暴雨强度最大,影响范围广,容易出现大范围持续性暴雨。

(2)北京 5—9 月均有暴雨过程出现。从各月暴雨过程各层比湿分析,7 月最大,5 月最小,7 月 500 hPa 暴雨时段比湿是其他非暴雨时段 500 hPa 比湿的 2~6 倍。暴雨时段各层比湿明显大于非暴雨时段。500 hPa 比湿对暴雨预报具有很好的指示作用。

(3)按暴雨、小雨、无雨三种天气情况分析各层比湿,暴雨最大,小雨其次,无雨最小,变化最明显的仍是 500 hPa 比湿。

(4)将各层风分为 8 个方向分别统计了不同类型暴雨比湿在有无急流($\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)925、850、700、500 hPa 的比湿特征,风向为 $90^\circ \sim 225^\circ$ 有急流时比湿最大,风向在 $270^\circ \sim 315^\circ$ 有急流时比湿最小。

(5)从所有暴雨过程、大范围暴雨过程、不同月份、不同暴雨过程类型、不同降水量级各种比湿特征的统计分析可见,700 hPa 以下比湿是暴雨预报的重要水汽因子,本研究结果表明 500 hPa 比湿对暴雨预报的指示作用更明显,因为低层比湿阈值容易满足,而大范围暴雨需要 500 hPa 有丰富水汽条件。

参考文献

- 包慧濛,肖安,李薇,等,2021. 南方比湿特征及其与暴雨的关系[J]. 气象与环境科学,44(2):33-42. Bao H M, Xiao A, Li W, et al, 2021. Characteristics of specific humidity in South China and its relationship with rainstorm[J]. Meteor Environ Sci, 44(2):33-42(in Chinese).
- 陈红专,叶成志,陈静静,等,2019. 2017 年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J]. 气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al, 2019. Analysis of water vapor

- transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017[J]. Meteor Mon, 45(9): 1213-1226 (in Chinese).
- 符娇兰, 陈双, 沈晓琳, 等, 2019. 两次华北冷涡降水成因及预报偏差对比分析[J]. 气象, 45(5): 606-620. Fu J L, Chen S, Shen X L, et al, 2019. Comparative study of the cause of rainfall and its forecast biases of two cold vortex rainfall events in North China [J]. Meteor Mon, 45(5): 606-620 (in Chinese).
- 付智龙, 姜帅, 李国平, 等, 2025. 惠州前汛期暖区暴雨环流分型及其环境参量统计分析[J]. 气象, 51(4): 473-483. Fu Z L, Jiang S, Li G P, et al, 2025. Statistical analysis on classification of synoptic circulation of warm sector heavy rainfall and its ambient parameters in Huizhou during the first rainy season[J]. Meteor Mon, 51(4): 473-483 (in Chinese).
- 高安春, 申高航, 2022. 多源资料分析鲁西局地大暴雨成因及降水的微物理特征[J]. 气象, 48(11): 1475-1486. Gao A C, Shen G H, 2022. Causes and precipitation microphysical characteristics of localized heavy rainstorm in western Shandong based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 48(11): 1475-1486 (in Chinese).
- 辜旭赞, 于晓晶, 唐永兰, 等, 2014. 一次华南—江南持续暴雨的大尺度水汽场和中尺度特大暴雨模拟诊断分析[J]. 气象, 40(1): 18-27. Gu X Z, Yu X J, Tang Y L, et al, 2014. Diagnostic analyses of large-scale moisture and mesoscale severe rainstorm simulation of one continuous heavy rain event in South China[J]. Meteor Mon, 40(1): 18-27 (in Chinese).
- 郭艳君, 丁一汇, 2014. 1958~2005 年中国高空大气比湿变化[J]. 大气科学, 38(1): 1-12. Guo Y J, Ding Y H, 2014. Upper-air specific humidity change over China during 1958—2005[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1): 1-12 (in Chinese).
- 季崇萍, 张迎新, 乔林, 等, 2020. 北京天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社. Ji C P, Zhang Y X, Qiao L, et al, 2020. Beijing Weather Forecast Handbook[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 孔祥伟, 杨建才, 李红, 等, 2021. 河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J]. 气象, 47(4): 412-423. Kong X W, Yang J C, Li H, et al, 2021. Analysis on water vapor characteristics of an extreme rainstorm in the arid region of western Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 47(4): 412-423 (in Chinese).
- 李超, 崔春光, 徐慧燕, 等, 2022. 河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J]. 气象, 48(12): 1497-1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al, 2022. Characteristics associated with the transport, budget, conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(12): 1497-1511 (in Chinese).
- 李武阶, 李俊, 公颖, 等, 2007. 2004 年梅雨期武汉上空水汽的演变及其与暴雨的关系[J]. 气象, 33(2): 3-9. Li W J, Li J, Gong Y, et al, 2007. Evolution characteristics of vapor over Wuhan in Meiyu period in 2004 and its relationship with heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 33(2): 3-9 (in Chinese).
- 梁维亮, 翟丽萍, 农孟松, 等, 2019. 广西一次深秋暴雨过程降水时空差异成因分析[J]. 暴雨灾害, 38(1): 7-16. Liang W L, Zhai L P, Nong M S, et al, 2019. Analysis on the spatiotemporal difference of rainfall in a Guangxi late autumn rainstorm event[J]. Torr Rain Dis, 38(1): 7-16 (in Chinese).
- 陆渝蓉, 高国栋, 1984. 我国大气中平均水汽含量与水分平衡的特征[J]. 气象学报, 42(3): 301-310. Lu Y R, Gao G D, 1984. The water vapour content and the water budget in the atmosphere over China[J]. Acta Meteor Sin, 42(3): 301-310 (in Chinese).
- 罗建英, 廖胜石, 黄归兰, 等, 2009. 2004 年 7 月广西汛期暴雨过程水汽特征[J]. 气象, 35(8): 61-69. Luo J Y, Liao S S, Huang G L, et al, 2009. Water vapor analysis of heavy rain events in Guangxi in July 2004[J]. Meteor Mon, 35(8): 61-69 (in Chinese).
- 聂云, 周继先, 顾欣, 等, 2018. “6.18”梅雨锋西段黔东南大暴雨个例诊断分析[J]. 暴雨灾害, 37(5): 445-454. Nie Y, Zhou J X, Gu X, et al, 2018. Diagnostic analysis of a torrential rain event occurred along western Meiyu front in Qiandongnan on 18 June 2015[J]. Torr Rain Dis, 37(5): 445-454 (in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 48(5): 533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5): 533-544 (in Chinese).
- 王宇虹, 徐国强, 贾丽红, 等, 2015. 太行山对北京“7.21”特大暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究[J]. 气象, 41(4): 389-400. Wang Y H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2015. Numerical simulation analysis on impact of Taihang Mountain and vapor sensitivity on the 21 July 2012 extremely severe rainstorm in Beijing[J]. Meteor Mon, 41(4): 389-400 (in Chinese).
- 许彬, 熊秋芬, 张玉婷, 2019. 一次热带风暴背景下南昌暴雨的水汽来源及输送特征[J]. 气象, 45(10): 1392-1401. Xu B, Xiong Q F, Zhang Y T, 2019. Analysis of moisture source and transport pathways of a rainstorm with tropical cyclone in Nanchang[J]. Meteor Mon, 45(10): 1392-1401 (in Chinese).
- 杨涛, 杨莲梅, 2021. 基于探空资料的 1961—2018 年新疆高空大气比湿气候特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 15(3): 77-84. Yang T, Yang L M, 2021. Climatic characteristics of atmosphere specific humidity in Xinjiang from 1961 to 2018 based on radiosonde observation data[J]. Desert Oasis Meteor, 15(3): 77-84 (in Chinese).
- 姚秀萍, 谢启玉, 黄逸飞, 2022. 中国三江源地区降水研究的进展与展望[J]. 大气科学学报, 45(5): 688-699. Yao X P, Xie Q Y, Huang Y F, 2022. Advances and prospects on the study of precipitation in the Three-River-Source Region in China[J]. Trans Atmos Sci, 45(5): 688-699 (in Chinese).
- 叶朗明, 苗峻峰, 2014. 华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析[J]. 暴雨灾害, 33(4): 342-350. Ye L M, Miao J F, 2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in southern China[J]. Torr Rain Dis, 33(4): 342-350 (in Chinese).
- 曾小团, 农孟松, 赵金彪, 2007. 广西几次不同类型天气系统造成暴雨过程的物理量分析[J]. 气象研究与应用, 28(4): 1-4, 7. Zeng X

- T, Nong M S, Zhao J B, 2007. Analysis of the physical data of several rainstorm processes caused by different weather systems [J]. *J Meteor Res Appl*, 28(4): 1-4, 7 (in Chinese).
- 张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等, 2022. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J]. *气象*, 49(12): 1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2022. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China [J]. *Meteor Mon*, 49(12): 1421-1434 (in Chinese).
- 张家斌, 邝美清, 张青宁, 等, 2016. 2012 年 11 月福建省多暴雨过程成因分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 17(5): 467-472. Zhang J B, Kuang M Q, Zhang Q N, et al, 2016. Fujian province rainstorm cause analysis in November 2012 [J]. *J PLA Univ Sci Technol (Nat Sci Ed)*, 17(5): 467-472 (in Chinese).
- 张万诚, 马涛, 郑建萌, 等, 2014. 秋季水汽输送特征及其与云南降水的关系[J]. *气象*, 40(3): 336-348. Zhang W C, Ma T, Zheng J M, et al, 2014. Characteristics of water vapor flux in autumn and its relationship with precipitation in Yunnan [J]. *Meteor Mon*, 40(3): 336-348 (in Chinese).
- 张晓茹, 纪晓玲, 张亚刚, 等, 2025. 贺兰山不同区域暴雨过程水汽输送特征[J]. *气象*, 51(3): 285-297. Zhang X R, Ji X L, Zhang Y G, et al, 2025. Water vapor transport characteristics during rainstorms in different regions of Helan Mountains [J]. *Meteor Mon*, 51(3): 285-297 (in Chinese).
- 张迎新, 李根娥, 张守保, 2008. 热带风暴海马变性前后的物理量诊断分析[J]. *气象*, 34(3): 49-55. Zhang Y X, Li G E, Zhang S B, 2008. Diagnoses analysis of physical characteristic changes of Tropical Storm Haima before and after its transformation [J]. *Meteor Mon*, 34(3): 49-55 (in Chinese).
- 翟盘茂, 周琴芳, 1997. 中国大气水分气候变化研究[J]. *应用气象学报*, 8(3): 341-351. Zhai P M, Zhou Q F, 1997. A study of climate change of atmospheric water vapor in China [J]. *Quart J Appl Meteor*, 8(3): 341-351 (in Chinese).
- 郑婧, 许爱华, 孙素琴, 等, 2018. 高空西北气流下特大暴雨的预报误差分析及思考[J]. *气象*, 44(1): 93-106. Zheng J, Xu A H, Sun S Q, et al, 2018. Forecast error analysis of extremely heavy rain under high-level northwest flow [J]. *Meteor Mon*, 44(1): 93-106 (in Chinese).
- 邹进上, 刘惠兰, 1981. 我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子[J]. *地理学报*, 36(4): 377-391. Zou J S, Liu H L, 1981. The basic features of distribution of water vapour content and their controlling factors in China [J]. *Acta Geogr Sin*, 36(4): 377-391 (in Chinese).
- Dai A G, Wang J H, Thorne P W, et al, 2011. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data [J]. *J Climate*, 24(4): 965-991.
- Held I M, Soden B J, 2000. Water vapor feedback and global warming [J]. *Annu Rev Energy Environ*, 25(1): 441-475.
- Kiehl J T, Trenberth K E, 1997. Earth's annual global mean energy budget [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(2): 197-208.
- McCarthy M P, Thorne P W, Titchner H A, 2009. An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes [J]. *J Climate*, 22(22): 5820-5838.
- Paltridge G, Arking A, Pook M, 2009. Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data [J]. *Theor Appl Climatol*, 98(3): 351-359.
- Trenberth K E, Stepaniak D P, 2003a. Covariability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and inter-annual timescales [J]. *J Climate*, 16(22): 3691-3705.
- Trenberth K E, Stepaniak D P, 2003b. Seamless poleward atmospheric energy transports and implications for the Hadley circulation [J]. *J Climate*, 16(22): 3706-3722.

(本文责编: 俞卫平)