

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，薛锋¹，孟宏新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 2016—2023 年 08 时至次日 08 时（北京时，下同）24 h 地面降水观测资料、08、20 时高空观测及欧洲中心 ERA5 再分析资料，统计得出北京地区共出现 83 个暴雨日，随后基于 500hPa 天气形势对北京暴雨进行分类，并对暴雨过程的高空（北京站 925、850、700、500、200 hPa）比湿特征开展统计分析。结果如下：北京地区暴雨过程分为 6 类：蒙古低涡低槽暴雨、副热带高压与西风槽结合暴雨、河套低涡型暴雨、东北冷涡型暴雨、热带气旋暴雨、西风槽与台风相结合暴雨。河套低涡和热带气旋类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；暴雨时段各层比湿显著高于非暴雨时段；6 类暴雨过程中，热带气旋暴雨和河套低涡暴雨的比湿最大，与之对应，这两类暴雨的降水强度与范围也最大；根据 1 h 降水资料，将高空观测时间（08、20 时）前后 1h 的降水情况分为三类： ≥ 10 mm 为暴雨、0.1~9.9 mm 为小雨、无降水，其中暴雨时段各层比湿最大，小雨时段次之，无雨时段最小；（5）统计 8 个方向各层风对应的暴雨过程比湿，结果显示风向为 $90^\circ \sim 225^\circ$ 且有急流时比湿最大，风向在 $270^\circ \sim 315^\circ$ 且有急流时比湿最小；本研究不仅统计了暴雨过程 700 hPa 以下层次的比湿特征，还发现 500 hPa 比湿增大对暴雨预报具有显著指示作用。

关键词：暴雨，分类，比湿特征分析

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

29 **Abstract:** Based on the 24 h surface precipitation observation data from 08:00 BT to
30 08:00 BT of the next day and upper-air sounding data at 08:00 BT and 20:00 BT during
31 2016–2023 as well as ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range
32 Weather Forecasts (ECMWF), this paper identifies a total of 83 torrential rain days in the
33 Beijing region during the study period. On this basis, Beijing torrential rain events are
34 classified according to the synoptic situations at 500 hPa, and a statistical analysis is
35 conducted on the specific humidity characteristics at 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa
36 and 200 hPa during the torrential rain days. The results are as follows: The torrential rain
37 events in the Beijing region are divided into six types: torrential rain induced by
38 Mongolian low vortex and trough, torrential rain associated with the subtropical high and
39 westerly trough, Hetao low vortex-type torrential rain, Northeast cold vortex-type torrential
40 rain, tropical cyclone-induced torrential rain, and torrential rain formed by the
41 combination of westerly trough and typhoon. The Hetao low-vortex type and tropical
42 cyclone type tend to produce more extensive extreme torrential rains, while the Northeast
43 cold vortex type is dominated by localized torrential rain. In terms of specific humidity, it
44 is markedly higher at all atmospheric levels during torrential rain periods than that during
45 non-torrential rain periods. Among the six types of torrential rain events, tropical
46 cyclone-induced torrential rain and Hetao low vortex-type torrential rain feature the
47 highest specific humidity, which corresponds to the strongest precipitation intensity and
48 the largest rainfall coverage of these two categories. Furthermore, based on hourly
49 precipitation data, the precipitation conditions within one hour before and after the
50 upper-air observation time (08:00 and 20:00 BT) are categorized into three grades:
51 torrential rain (≥ 10 mm), light rain (0.1–9.9 mm) and no precipitation. The specific
52 humidity is the highest at all levels during torrential rain periods, followed by that in light
53 rain periods, and the lowest specific humidity is found in rain-free periods. In addition, the
54 specific humidity of torrential rain events corresponding to winds from eight directions at
55 different levels is statistically analyzed, and the results indicate that the specific humidity
56 reaches its maximum when the wind direction ranges from 90° to 225° with jet streams,
57 and drops to its minimum when the wind direction is between 270° and 315° accompanied
58 by jet streams. Overall, this study has not only analyzed the specific humidity
59 characteristics below 700 hPa during torrential rain processes, but more specially found
60 that the increase in specific humidity at 500 hPa can serve as a significant predictor for
61 torrential rain forecasting.

62 **Key words:** torrential rain, classification, analysis of specific humidity characteristic

63

64

65 引言

66 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
67 气潜热传输的关键，也是降水的关键（Trenberth and Stepaniak, 2003a; 2003b）；同时水汽温室
68 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,
69 2000)。

70
71 国家重点研发计划（2022YFC3002904）“不同气候区致洪暴雨精细监测和多尺度预报技术”
72 项目资助

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

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

75

76

77 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。比湿是水汽与湿空气
78 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
79 重要物理量。

80 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
81 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
82 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
83 特征。

84 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)
85 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
86 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。除热带地区
87 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再分析资料得到
88 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
89 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
90 (2021)分析了新疆高空大气比湿气候特征。以上分析主要也是集中在700 hPa及以下层次的分
91 析，对于对流层中层500 hPa比湿分析较少。

92 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三个条件。因此，水汽分析
93 历来是气象工作者在暴雨分析预报中关注的重点，如王宇虹等(2015)对2012年7月21日北京
94 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
95 雨水汽和急流特征诊断分析。李武阶等(2007)分析了2004年梅雨期武汉上空对流层中低层水
96 汽的演变物理，及其与暴雨的关系。罗建英等(2009)等分析了2004年7月广西汛期暴雨过程
97 中的水汽和环流变化情况。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
98 拟诊断分析。张万斌等(2014)分析了秋季水汽输送特征对云南降水的影响。许彬等(2019)热
99 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)对甘肃河西走廊干旱
100 区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
101 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
102 水的微物理特征。李超等(2022)分析河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地
103 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)
104 等对惠州前汛期暖区暴雨进行环流分型及其环境参量统计分析。以上研究中，侧重于特定暴雨个
105 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。

106 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, 925 hPa
107 比湿一般有 16~18 g/kg, 局地达 20 g/kg 以上; 郑婧等(2018)对两次暴雨过程的比湿分析, 850
108 hPa 均超过 14 g/kg; 张家斌等(2016)分析一次冬季暴雨过程, 850 hPa 比湿大于 8 g/kg, 聂云
109 等(2018)分析贵州一次梅雨锋暴雨过程 850 hPa 比湿达 18 g/kg。曾小团等(2007), 梁维亮等
110 (2019), 叶朗明和苗峻峰(2014)对华南几次暴雨过程的 850 hPa 比湿研究也发现, 比湿均
111 大于 11 g/kg。包慧濛等(2021)等分析了南方比湿特征及其与暴雨的关系, 850 hPa 为例, 25.5°N
112 以南区域冬季暴雨日平均比湿为 8.2~9.2 g/kg, 春、秋季为 11.2~14.8 g/kg, 夏季为 15.3 g/kg 左
113 右; 25.5°N 以北区域分别为 7.4 g/kg 左右、9.0~12.2.9 g/kg、14.5~15.4 g/kg。以前研究重点集中
114 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)
115 基本没有研究。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分
116 析总结, 这些数值对日常业务暴雨预报的水汽条件考虑有一定的指示意义, 但仍然比较笼统, 没
117 有细致反映高空不同层次比湿与暴雨的关系。

118 本文利用地面及高空观测资料, 选取北京地区 2016—2023 年一年共计 83 d 暴雨日, 按 500 hPa
119 形势进行环流分类, 统计暴雨过程不同月份、不同暴雨天气类型、不同降水类型、不同风向在不
120 同高度层(925、850、700、500、200 hPa)比湿特征, 不仅仅分析了对流层中低层(925、850、
121 700 hPa)比湿对暴雨预报指示作用, 创新性发现对流层中层 500 hPa 比湿对暴雨预报指示作用同
122 样十分重要。

123 1 资料和方法

124 1.1 资料

125 2014 年开始, 全国气象要素地面自动观测站开始大量布设, 2016 年北京区域站点十分密集。
126 因此本研究选取 2016—2023 年共计 8 年的地面观测站(包括国家站和区域站)、高空观测站资
127 料。气象中心专职人员对资料进行空间一致性、时间一致性及孤立点等质量控制, 数据真实可靠。
128 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 ≥ 50 mm 的站次 ≥ 3 个站, 并且
129 至少一站 1 h 降水 ≥ 10 mm 为一个暴雨日, 共计统计出 83 个暴雨日。如果站点过少(1 个站或 2
130 个站), 可能存在观测错误及暴雨局地性太强引起。站点过多, 会导致暴雨过程少。由于城区观
131 测站点多、山区站点少, 可能会导致局地暴雨过程主要集中在城区。对于非连续性暴雨、选取降
132 水时段高空观测各标准时次(北京时当天 08、20 时、次日 08 时), 以及暴雨开始前一日 20 时

133 和暴雨结束当天 20 时（非暴雨时段）共 5 个时次北京站（54511）925、850、700、500、200 hPa
134 观测资料统计比湿分布；对于连续性暴雨(2016 年 7 月 19—21 日、2017 年 8 月 11—13 日、2018
135 年 7 月 15—18 日、2018 年 7 月 20—23 日、2018 年 8 月 11—13 日、2020 年 7 月 1—3 日、2021
136 年 7 月 1—3 日、2021 年 7 月 11—13 日、2021 年 7 月 16—18 日、2021 年 8 月 13—16 日、2022
137 年 7 月 26—28 日、2023 年 7 月 11—13 日、2023 年 7 月 29—8 月 1 日)，选取降水时段高空观测
138 各标准时次（当天 08、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（非
139 暴雨时段）资料进行统计。

140 大部分暴雨过程是由一次或多次中小尺度天气系统造成短时强降水引起，因此 8 d 暴雨过程
141 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
142 水资料，定义高空观测时间（08 时、20 时）前后 1 小时内区域内至少有 1 个站 1 h 降水量 $\geq 10\text{mm}$
143 定义为暴雨、0.1~9.9mm 为小雨、无雨三种情况。期间共有无雨 190 个时次，小雨 176 个时次，
144 暴雨 159 个时次。

145 1.2 方法

146 利用探空资料各层的大气温度和露点温度差，根据（1）式计算出各气压层上的实际水汽压，
147 然后利用（2）式计算各气压层上的比湿。

$$148 \quad e = 610.78 \exp^{\frac{a t_d}{273.16 + t_d - b}} \quad (1)$$

149 式中：e 为水汽压（hPa）、 t_d 为某高度上空气的露点温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；a、b 为常数，水面上 a 为 17.269，
150 b 为 35.86，冰面上 a 为 21.874，b 为 7.6。

$$151 \quad q = \frac{622e}{P - 0.378e} \quad (2)$$

152 式中：q 为空气比湿（g/kg），P 为某高度上的气压（hPa）。

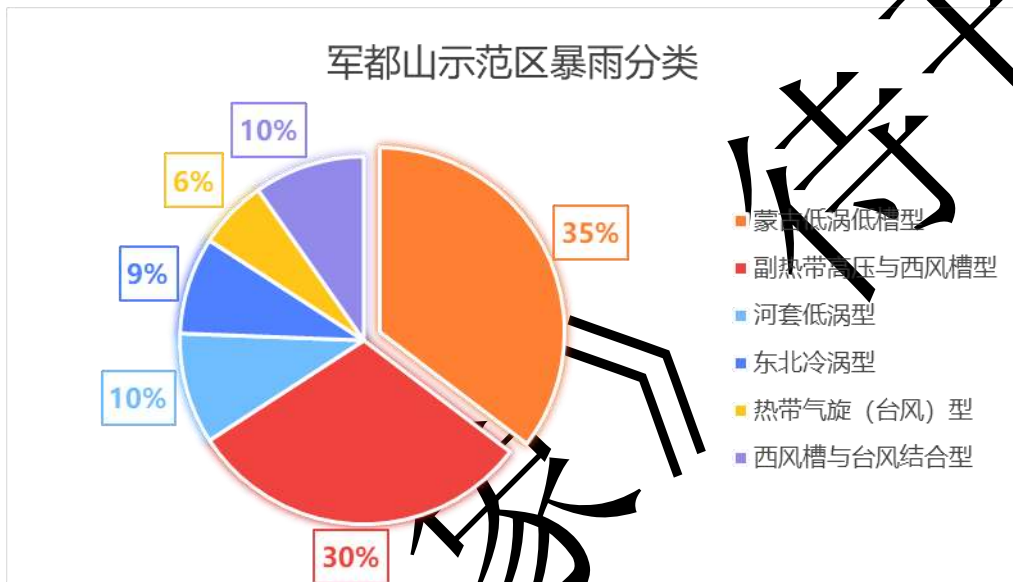
153 利用高空观测资料的 500 hPa 影响系统对北京暴雨进行分类，参考《北京天气预报手册》（季
154 崇萍等，2020）书中对暴雨分类，对其中分类作了部分修改，暴雨过程共分为 6 类：蒙古低涡低
155 槽型、副热带高压与西风槽型（以下简称副高与西风槽型）、河套低涡型、东北冷涡型、热带气
156 旋（台风）型、西风槽与台风结合型（台风中心位于长江中下游）。

157

158 2 研究结果分析

159 2.1 北京暴雨分类

160 83 d 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%。
161 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
162 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 9%。热带气
163 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%，全部
164 出现了大范围暴雨过程。西风槽与台风相结合暴雨共 8 d，占比 10%。暴雨过程分类占比见图 1。



165 图 1 2016—2023 年北京暴雨分类

166 Fig. 1 Classification of torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023

167 83 d 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
168 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)、
169 热带气旋（台风）型 6 d (6/6)、西风槽与台风结合型 4 d (4/8)。6 类暴雨过程中台风暴雨最多、
170 其次是河套低涡型，东低冷涡型和副高与西风槽型暴雨出现大范围的暴雨过程较少。其中最
171 强暴雨过程为 2023 年 7 月 29 日 08 时至 8 月 1 日 08 时（台风暴雨）和 2016 年 7 月 19 日 08 时至
172 21 日 08 时（河套低涡型）。6 类暴雨的主要影响系统见表 2。

174

175

176

177

表 1 2016—2023 年大范围暴雨分类

178

Table 1 Classification of widespread torrential rain events 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	

179

注：表中为暴雨开始时间（年-月-日 时）。

180

表 2 2016—2023 年 6 类暴雨的主要影响系统及水汽来源

181

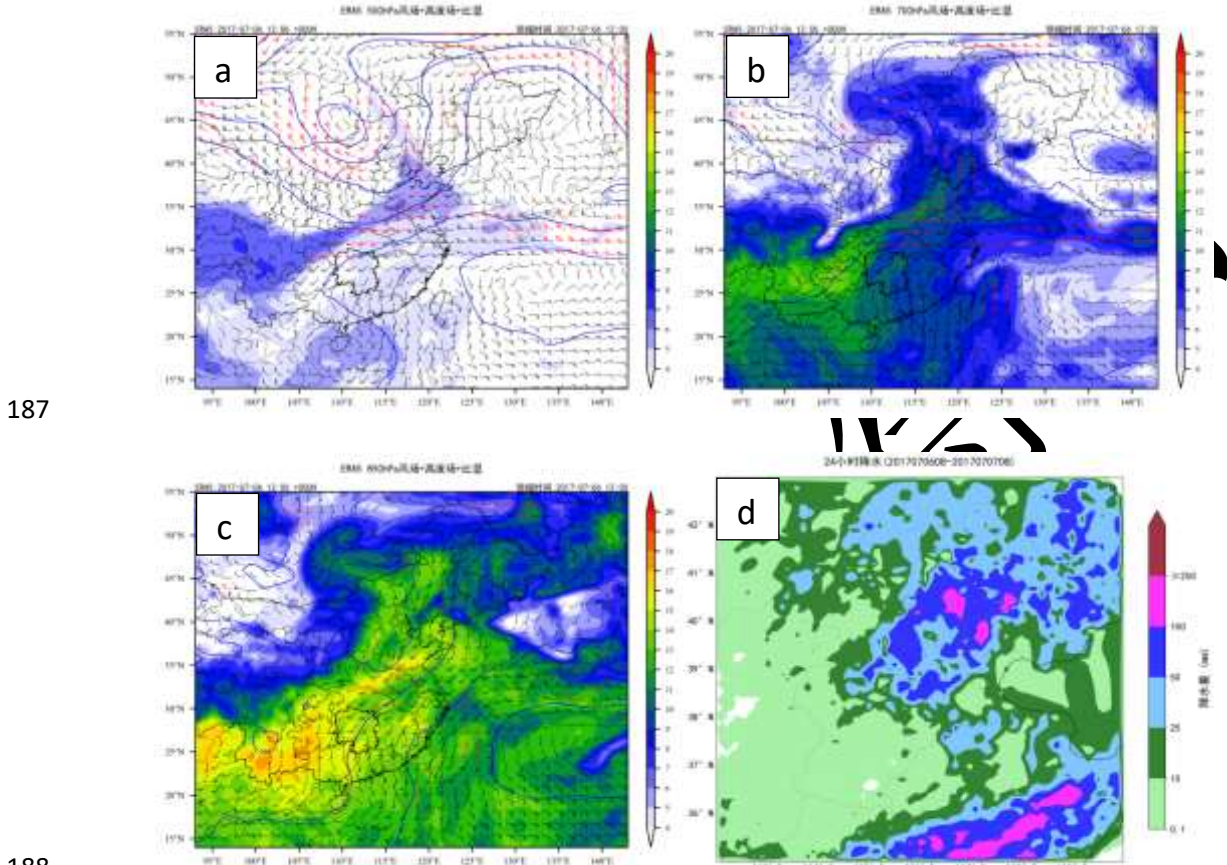
Table 2 Major impact systems and moisture sources of six types of torrential rain events from 2016 to 2023

暴雨类型	500 hPa 影响系统	600 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 500 hPa 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	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

182

183 2.1.1 蒙古低涡低槽型

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



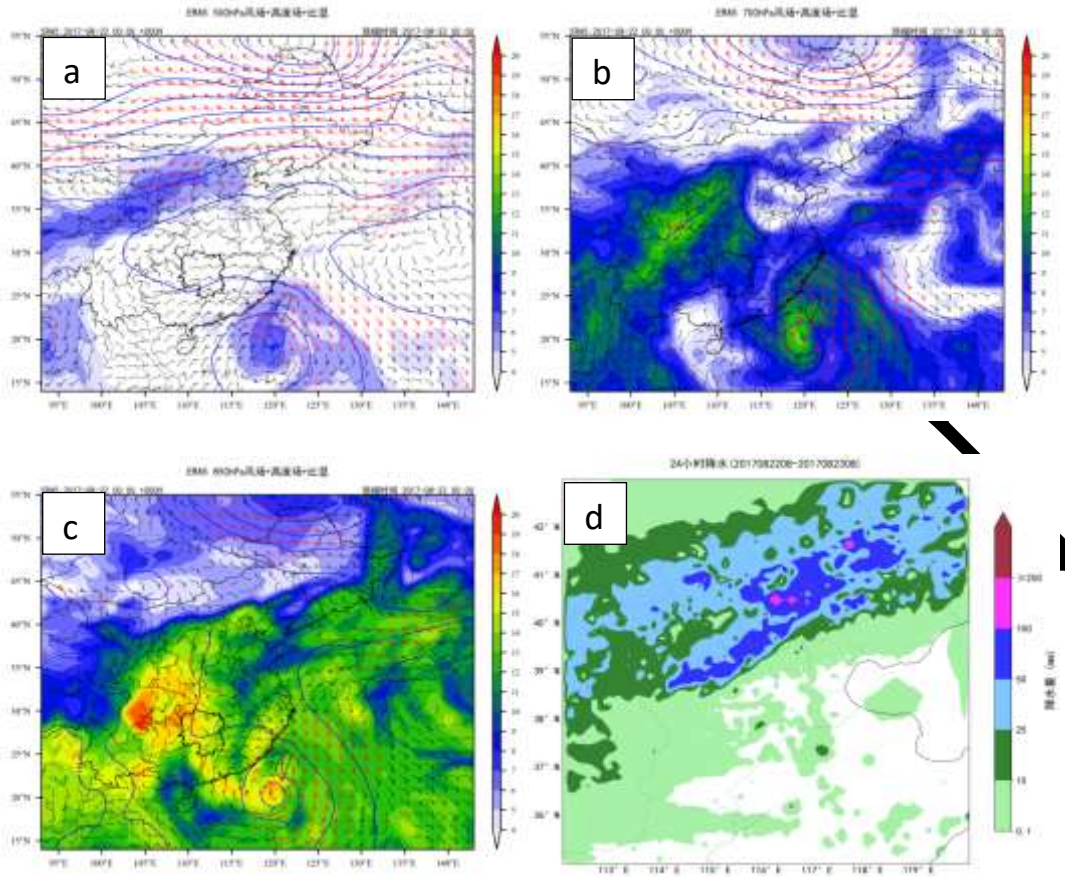
189 图 2 2017 年 7 月 6 日 20 时 (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa 高度场（等值线，单位：dagpm）、风场（风羽）、比湿场（填
190 色，单位：g/kg）；(d) 6 日 08 时至 7 日 08 时降水量（单位：mm）

191 Fig.2 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored, unit: $g \cdot kg^{-1}$) at (a) 500 hPa,
192 (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 20:00 BT 6, and (d) precipitation (unit: mm) from 08:00 BT 6 to 08:00 BT 7 July 2017

193 2.1.2 副高与西风槽型

194 这类暴雨过程，北京位于稳定少动副高边缘东部，水汽输送条件十分有利；西风槽（或低涡）
195 东移影响北京，触发降水。如 2017 年 8 月 22—23 日暴雨过程（图 3）。

196



197

198

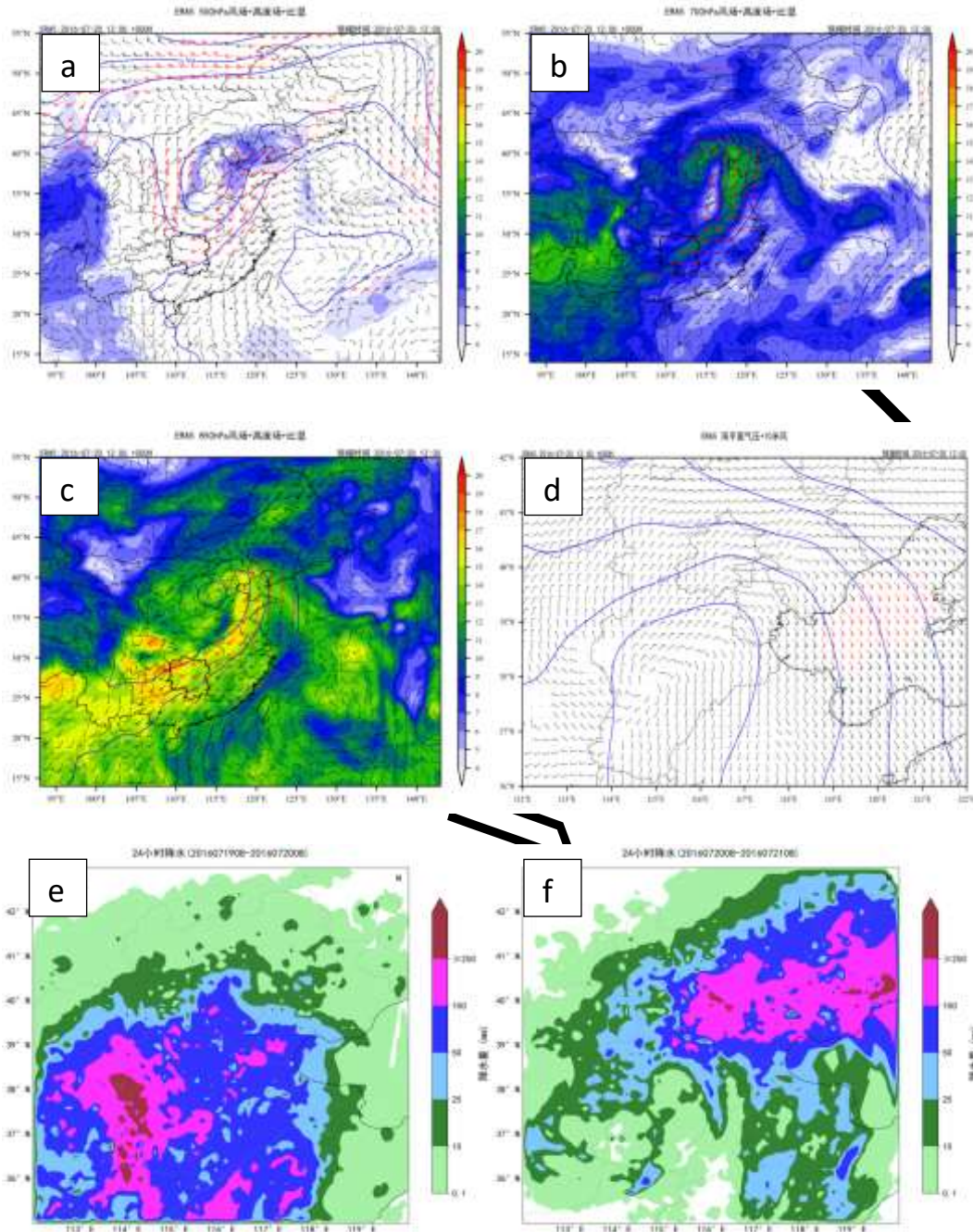
199 图3 2017年8月22日08时 (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)、风场(风羽)、比湿场(填
 200 色, 单位: g/kg); (d) 22日08时至23日08时降水量(单位: mm)

201 Fig.3 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored, unit: $g \cdot kg^{-1}$) at (a) 500 hPa,
 202 (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 08:00 BT 22, and (d) precipitation (unit: mm) from 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23 August 2017

203 2.1.3 河套低涡型

204 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
 205 送, 形成大范围连续性暴雨过程。如 2016年7月19—21日出现了2天大范围大暴雨过程(图4)。

206



207

208

209

210 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
 211 色, 单位: g/kg); (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
 212 08时降水量 (单位: mm)

213 Fig.4 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored, unit: $g \cdot kg^{-1}$) at (a) 500 hPa,
 214 (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 20:00 BT 20, (d) surface wind field (barb) and pressure field (contour, unit: hPa), and (e, f) precipitation (unit:
 215 mm) from (e) 08:00 BT 19 to 08:00 BT 20 and (f) 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 July 2016

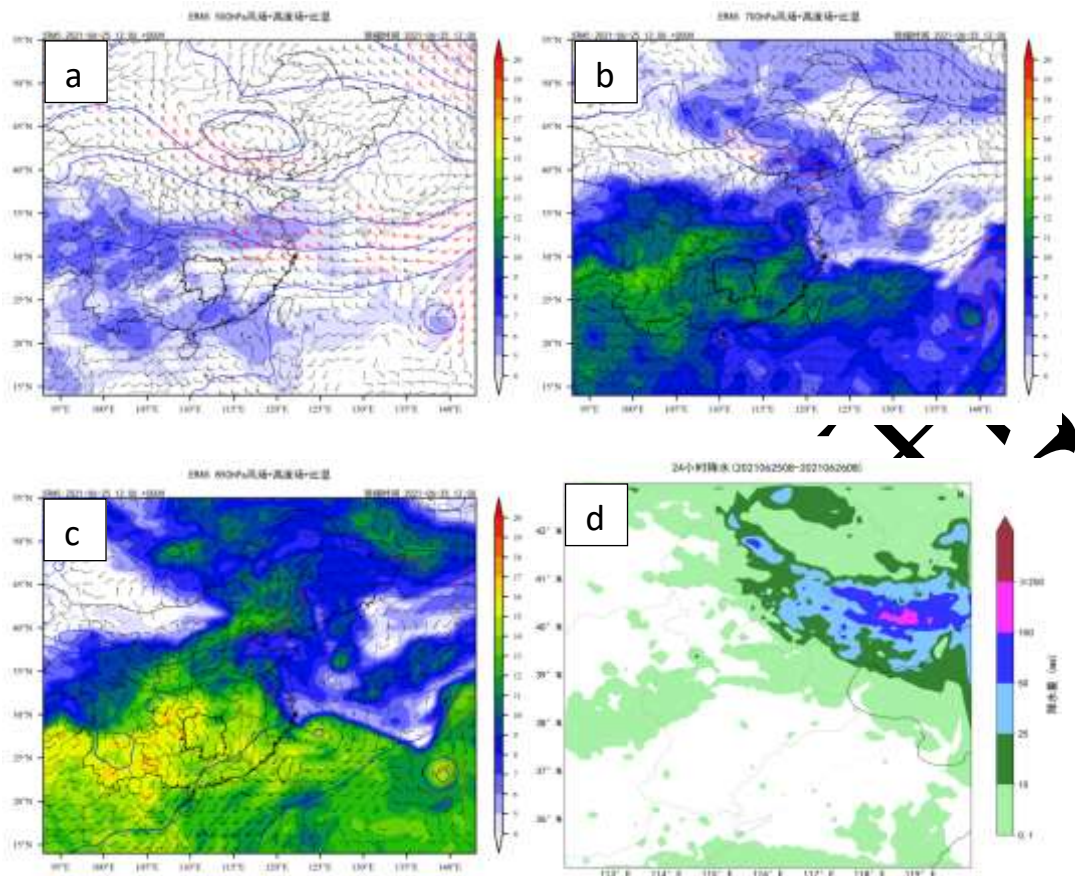
216

217 2.1.4 东北冷涡型

218 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

219 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
 220 年 5 月 25—26 日暴雨过程（图 5）。

221



222

223

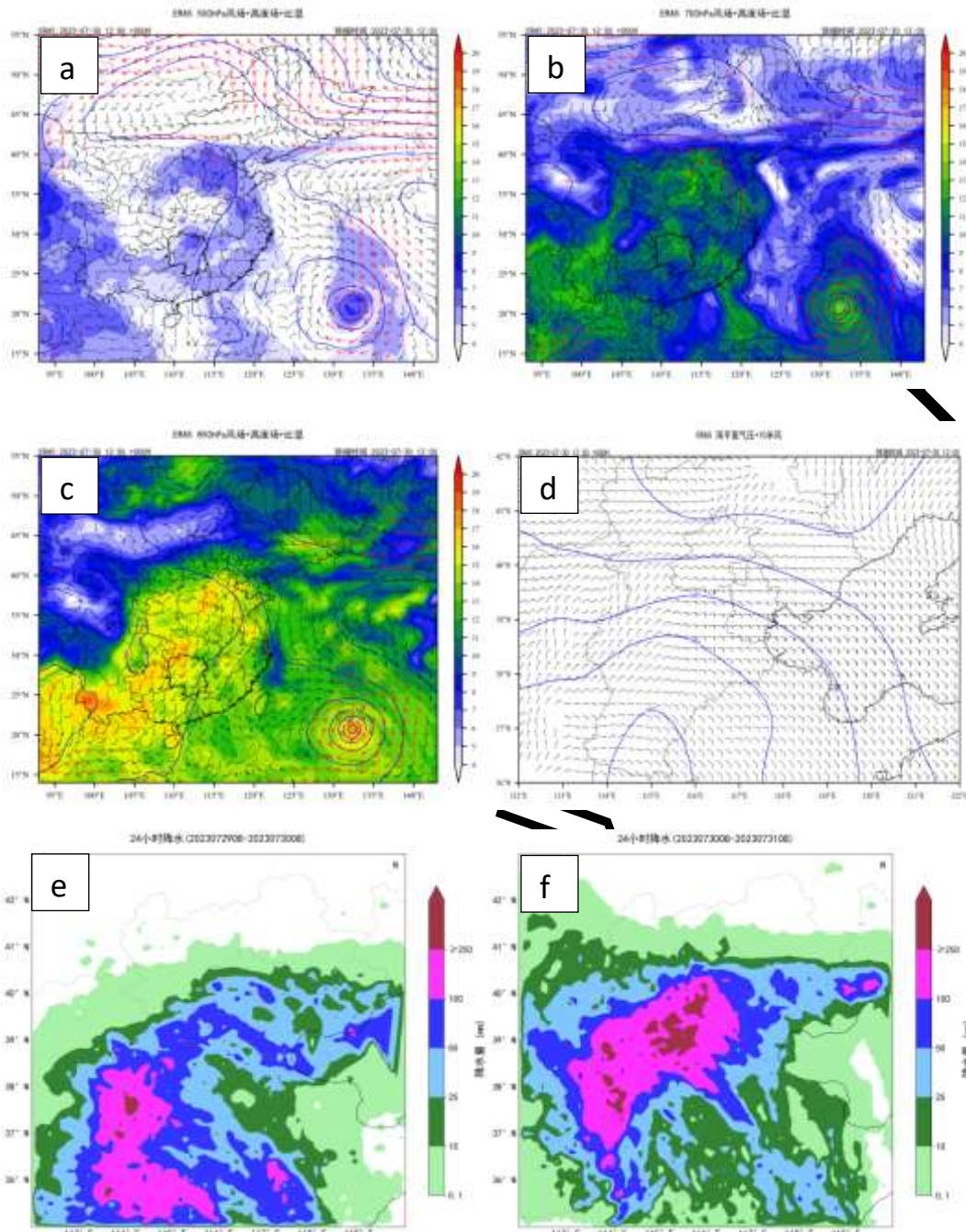
224 图 5 2021 年 6 月 25 日 20 时 (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa 高度场（等值线，单位：dagpm）、风场（风羽）、比湿场（填
 225 色，单位：g/kg）；(d) 25 日 08 时至 26 日 08 时降水量（单位：mm）

226 Fig.5 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored, unit: $g \cdot kg^{-1}$) at (a) 500 hPa,
 227 (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 20:00 BT 25, and (d) precipitation (unit: mm) from 08:00 BT 25 to 08:00 BT 26 June 2021

228

229 2.1.5 热带气旋（台风）型

230 北京地区受台风残涡东南急流与副高边缘的偏南风共同影响，水汽条件最好。北京西部受迎
 231 风坡地形影响容易出现大范围的特大暴雨。如 2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日北京出现了大范围的
 232 特大暴雨（图 6）。



233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

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, 单位: g/kg); (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 (单位: mm)

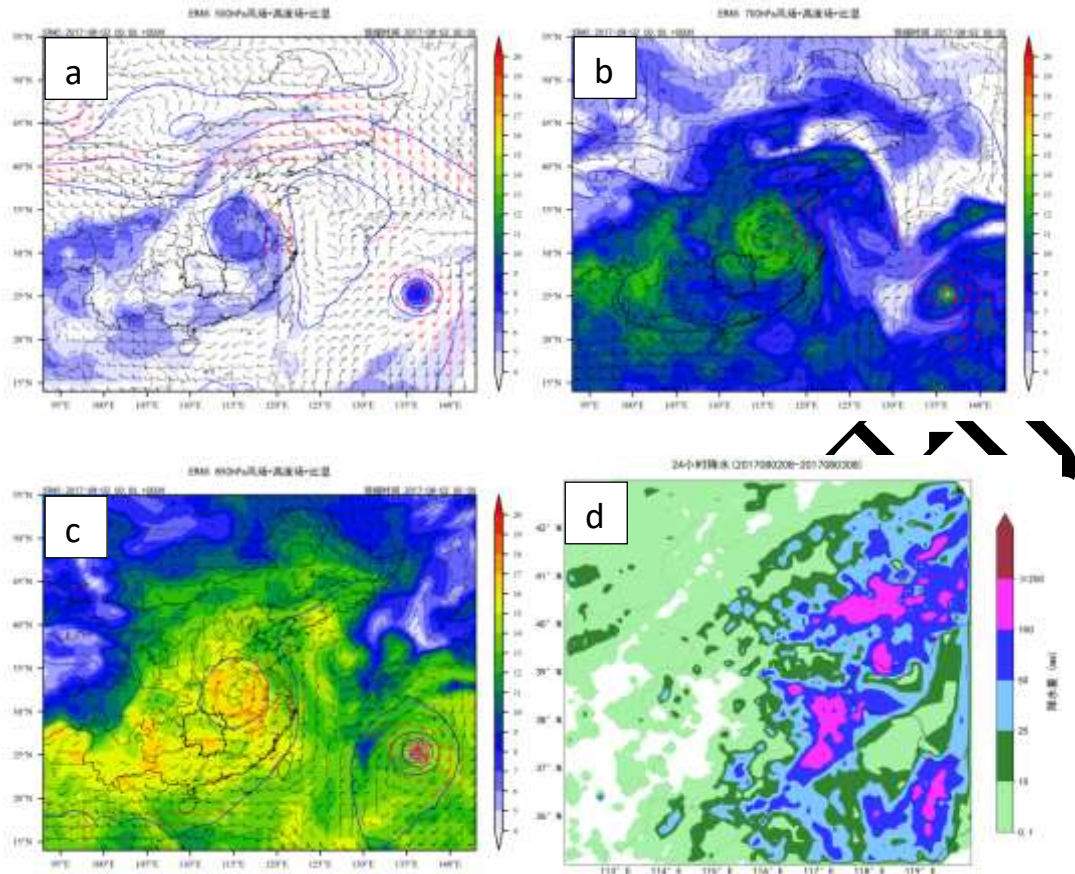
Fig.6 The geopotential height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 20:00 BT 30, (d) surface wind field (barb) and pressure field (contour, unit: hPa), and (e, f) precipitation (unit: mm) from (e) 08:00 BT 29 to 08:00 BT 30 and (f) 08:00 BT 30 to 08:00 BT 31 July 2023

2.1.6 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, 形成暴雨过程。如

245 2017年8月2—3日暴雨过程(图7)。

246



247

248

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

251 Fig.5 The height field (contour, unit: dagpm), wind field (barb) and specific humidity field (colored, unit: $g \cdot kg^{-1}$) at (a) 500 hPa, (b) 700
 252 hPa and (c) 850 hPa at 08:00 BT 2, and (d) precipitation (unit: mm) from 08:00 BT 2 to 08:00 BT 3 August 2017

253

254

255 2.2 高空比湿分析结果

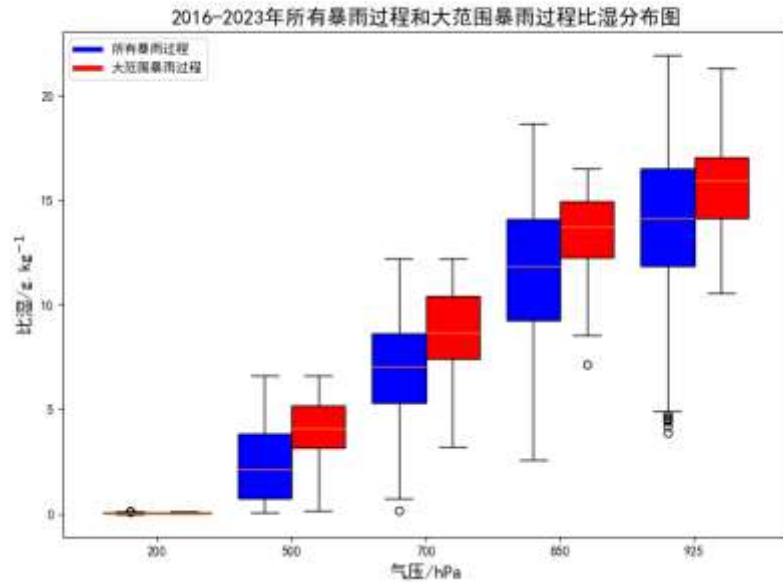
256 2.2.1 总体比湿特征分析

257 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的比湿明显下降
 258 (图8),比湿大值区主要集中在对流层中下层,200hPa比湿很小。500、700、850、925hPa
 259 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、
 260 4.1、8.67、12.274、15.93g/kg,所有暴雨过程五层比湿中位数分别为0.02、2.13、7.08、11.86、
 261 14.15g/kg,大范围暴雨过程与所有暴雨过程在预报员重点关注700hPa以下层次比湿虽然有差异,

262 但 500 hPa 两者之间的差异更明显（分别为 4.1、2.13 g/kg），前者接近后者的两倍，说明持续大
263 范围的强降水不仅对流层低层比湿比较大，对流层中层 500 hPa 的比湿仍然需要满足比较大的条
264 件。

265

266



267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

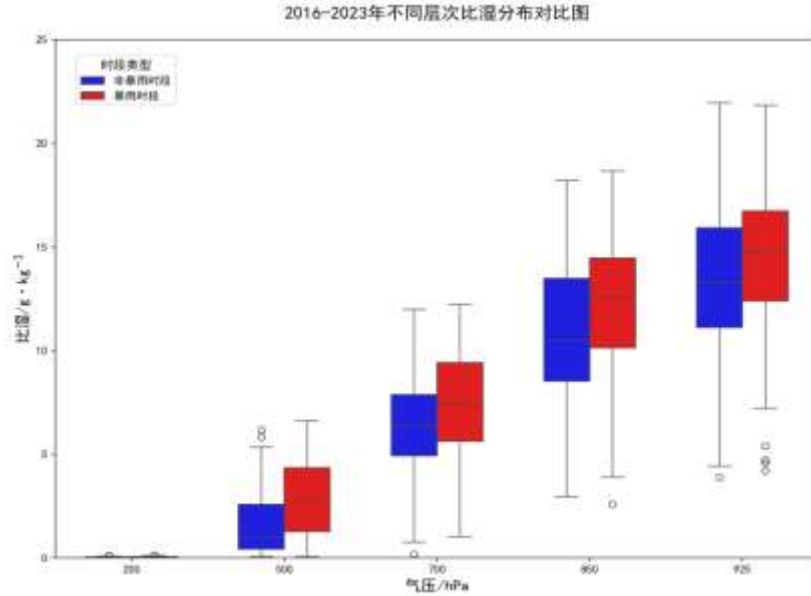
278

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，箱体中三条横线由下而上分别代表第 25%、50% 和 75% 分位值。

图 8 2016—2023 年所有暴雨过程及大范围暴雨过程比湿统计

Fig. 8 Statistics of specific humidity during all torrential rain processes and widespread torrential rain processes from 2016 to 2023

2016—2023 年所有暴雨过程中，暴雨时段（暴雨开始当天 08 时、20 时、暴雨结束日 08 时）
比非暴雨时段（暴雨开始前一日 20 时，暴雨结束日 20 时），除 200 hPa 外，各层比湿前者明显
大于后者。暴雨时段各层比湿（200、500、700、850、925 hPa）中位数为 0.02、2.6、7.28、12.33、
14.6 g/kg；非暴雨时段各层比湿中位数分别为 0.02、1.04、6.23、10.41、12.2.12 g/kg。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。



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，箱体三条绕线自下而上分别代表第25%、50%和75%分位值。

图 9 2016—2023 年所有暴雨过程暴雨时段及非暴雨时段比湿统计

Fig. 9 Statistics of specific humidity during torrential rain periods and non-torrential rain periods for all heavy rain processes from 2016 to 2023

2.2.2 不同月份暴雨比湿特征分析

北京 2016—2023 年 5—9 月均有暴雨过程出现，从各月暴雨过程各层比湿分析（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 月出现了 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，除 5 月 200、700 hPa 及 9 月 200 hPa 暴雨时段比非暴雨段略小，可能是因为 5 月、9 月暴雨样本少的原因，其他几个月暴雨时段各层比湿大部分都明显大于非暴雨时段，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 比湿也是暴雨预报重点关注因子。

表 3 2016—2023 年 5—9 月暴雨过程各层比湿中位数（单位：g/kg）

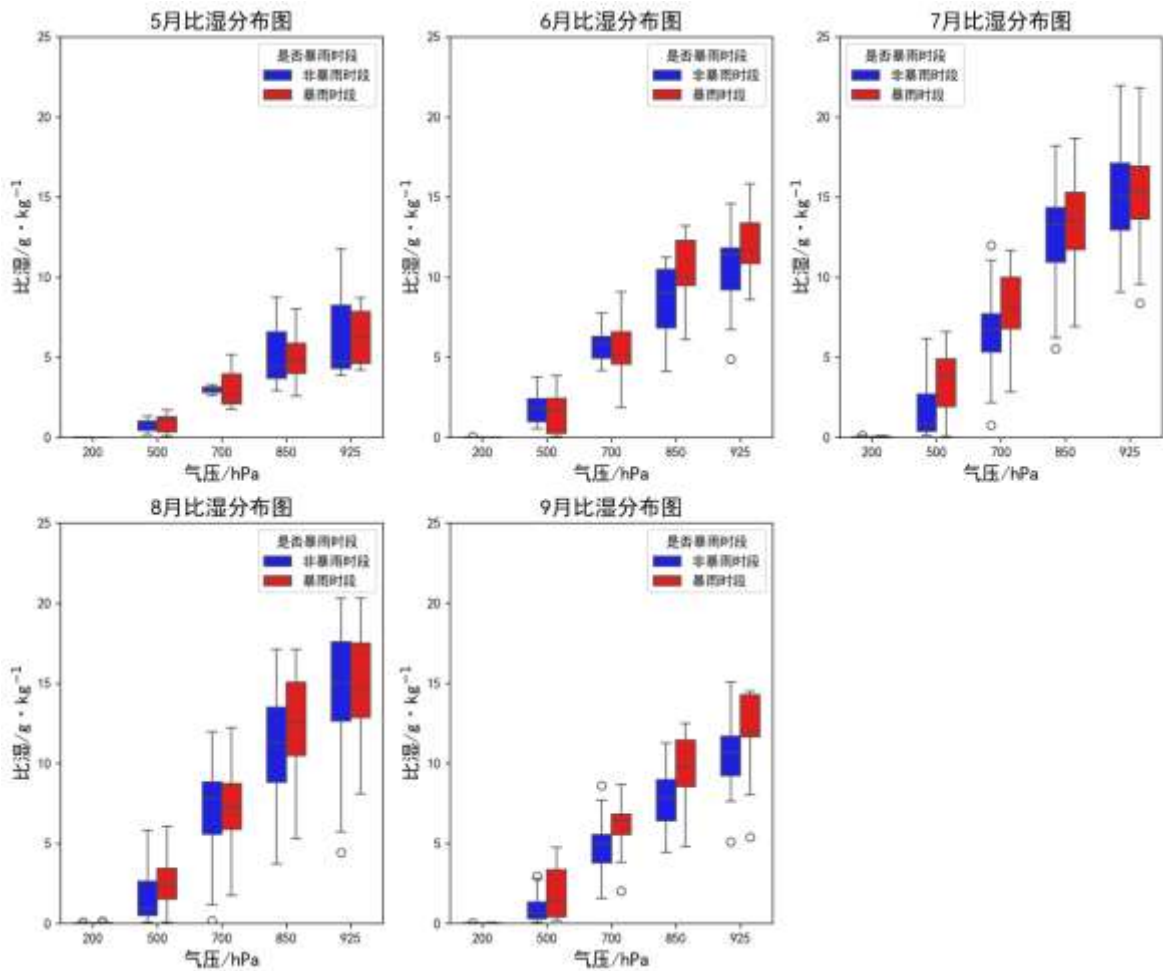
Table 3 Median specific humidity at various levels during torrential rain processes from May to September from 2016 to 2023 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

月份	是否暴雨时段	200 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa
5	暴雨时段	0.0	1.16	2.66	4.84	6.25
	非暴雨时段	0.01	0.73	2.98	4.44	4.75
6	暴雨时段	0.02	1.67	5.15	10.0	11.62
	非暴雨时段	0.02	1.84	5.86	9.03	11.44
7	暴雨时段	0.03	3.85	8.09	13.53	15.44
	非暴雨时段	0.02	0.84	6.74	12.27	15.06
8	暴雨时段	0.03	2.31	7.28	12.57	14.69

9	非暴雨时段	0.02	0.94	7.81	11.3	15.02
	暴雨时段	0.01	1.48	6.43	9.77	12.0
	非暴雨时段	0.02	0.62	5.0	7.86	10.69

295

296



297

298

299

300

301

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，箱体内三条绕线自下而上 分别代表第 25%、 50%和 75% 分位值。

图 10 2016—2023 年不同月份暴雨各层比湿分布

302

Fig. 10 Distribution of specific humidity at various levels during torrential rain processes in different months from 2016 to 2023

303

304 2.2.3 不同暴雨类型比湿特征分析

305

306

307

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 g/kg，远大于其他类型暴雨 500 hPa

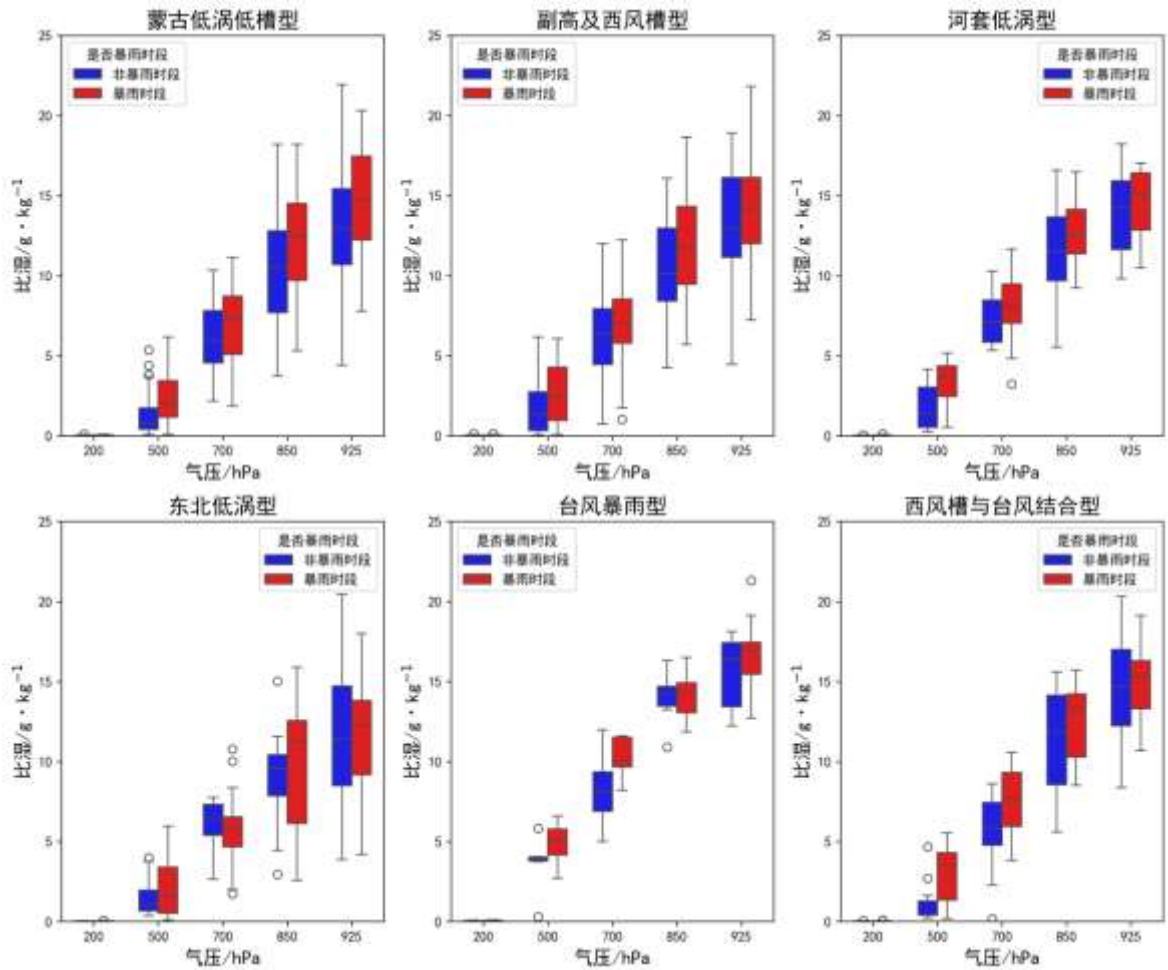
308 比湿；西风带系统中河套低涡型暴雨过程降水最大，各层比湿也比较集中，850 hPa、925 hPa 的
 309 比湿均小于西风槽与台风结合型暴雨过程，但 700 hPa、500 hPa 的比湿大于后者，再次证明低层
 310 比湿大于一定的阈值后，对流层中层 700 hPa、500 hPa，尤其是 500 hPa 比湿是预报暴雨水汽条
 311 件的关键因素。蒙古低涡低槽型、副高与西风槽型这两种类型基本相当，两类暴雨过程的数量也
 312 相当。东北冷涡型暴雨各层比湿最小，很难出现大范围暴雨过程。

表 4 2016—2023 年不同类型暴雨各层比湿中位数（单位：g/kg）

Table 4 Median specific humidity at various levels for different types of torrential rain processes from 2016 to 2023 (unit: g · 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	暴雨时段	0.03	1.96	7.33	12.49	14.78
	非暴雨时段	0.02	0.79	5.95	10.54	12.96
副高与西风槽型	暴雨时段	0.02	2.48	7.08	11.78	14.06
	非暴雨时段	0.02	1.33	6.36	10.74	12.96
河套低涡型	暴雨时段	0.03	3.68	8.06	12.57	15.06
	非暴雨时段	0.02	1.4	7.17	11.52	14.25
东北冷涡型	暴雨时段	0.01	1.55	5.84	11.29	12.27
	非暴雨时段	0.01	1.08	6.49	10.58	11.48
热带气旋（台风）型	暴雨时段	0.06	5.08	10.0	14.32	16.94
	非暴雨时段	0.03	3.94	8.1	14.23	16.4
西风槽与台风结合型	暴雨时段	0.02	3.5	7.73	13.27	15.35
	非暴雨时段	0.02	0.45	5.84	11.86	14.69

315
 316
 317



318

319

320

321

322

323

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，箱体内三条横线自上而下分别代表第 25%、50% 和 75% 分位值。

图 11 2016—2023 年不同类型暴雨过程各层比湿分布

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

324 2.2.4 不同降水量级比湿特征分析

325

326

327

328

329

330

331

332

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。期间无雨 190 个时次，小雨 176 个时次，暴雨 159 个时次。3 类天气中暴雨时段各层比湿最大，其次小雨时段、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，进一步说明大范围暴雨过程各层比湿更大。3 种天气情况虽然 850、925 hPa 比湿仍然是暴雨最大，无雨最小，但无雨、小雨比湿也比较大，中位数均分别大于 10、13 g/g。500 hPa 比湿，无雨时比湿明显小于小雨与暴雨，所有暴雨过程为 3.85 g/kg，大范围暴雨过程为 5.08 g/kg（见图 12 和表 3）。6 类暴雨过程也有类似结论（图略）。

333

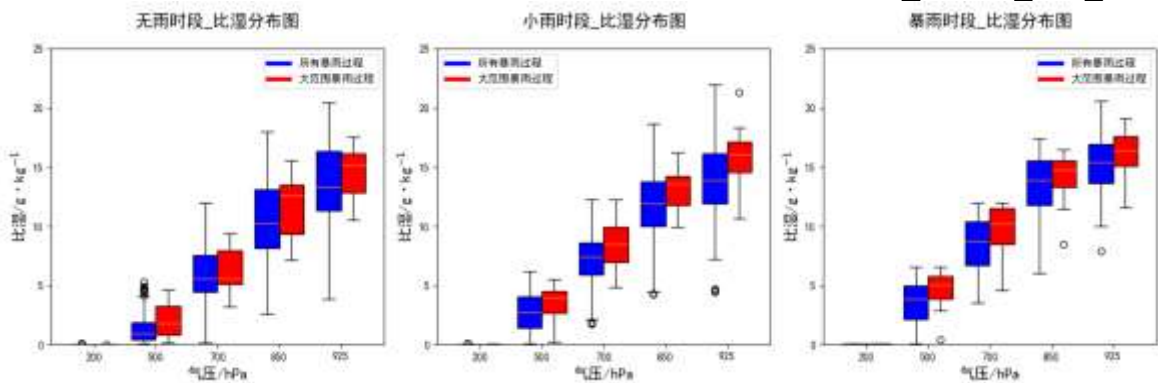
表 5 2016—2023 年不同降水量级比湿分布特征 (单位: g/kg)

334

Table 5 Distribution characteristics of specific humidity for different precipitation intensities from 2016 to 2023 (unit: g · kg⁻¹)

降水类型	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

335



336

337

注: 箱线图中触须的上端和下端分别代表统计

338

最大值和最小值, 箱体内部三条横线自下而上 分别代表第 25%、50% 和 75% 分位值。

339

图 12 2016—2023 年暴雨过程不同降水量级各层比湿分布

340

Fig. 12 Distribution of specific humidity for different precipitation intensities during heavy rainfall events from 2016 to 2023

341

将 83 d 暴雨过程所有时段分成无雨、小雨、暴雨时序点, 绘制三类降水 500、700、850、925

342

hPa 的时序图 (图 10), 横坐标是无雨、小雨、暴雨按时间排列的时序点, 纵坐标是比湿。各层

343

总体比湿均是暴雨最大, 小雨其次, 无雨最小。

344

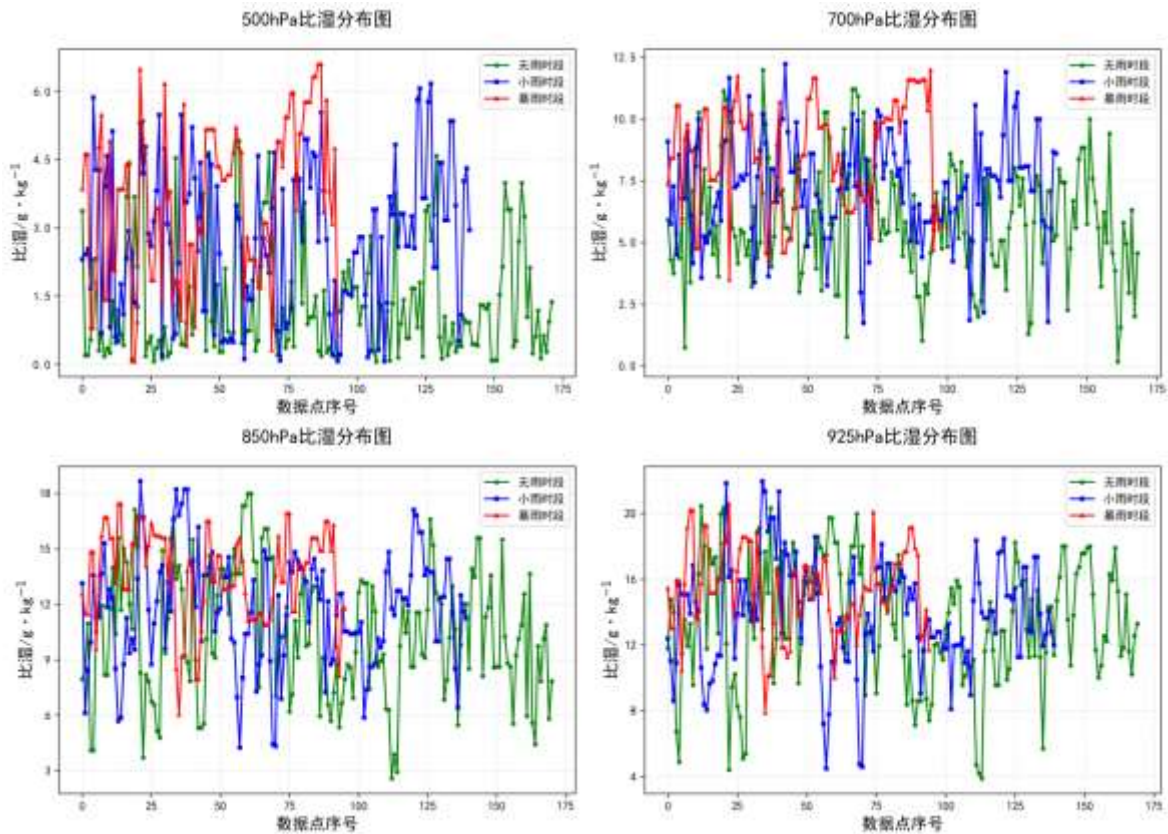


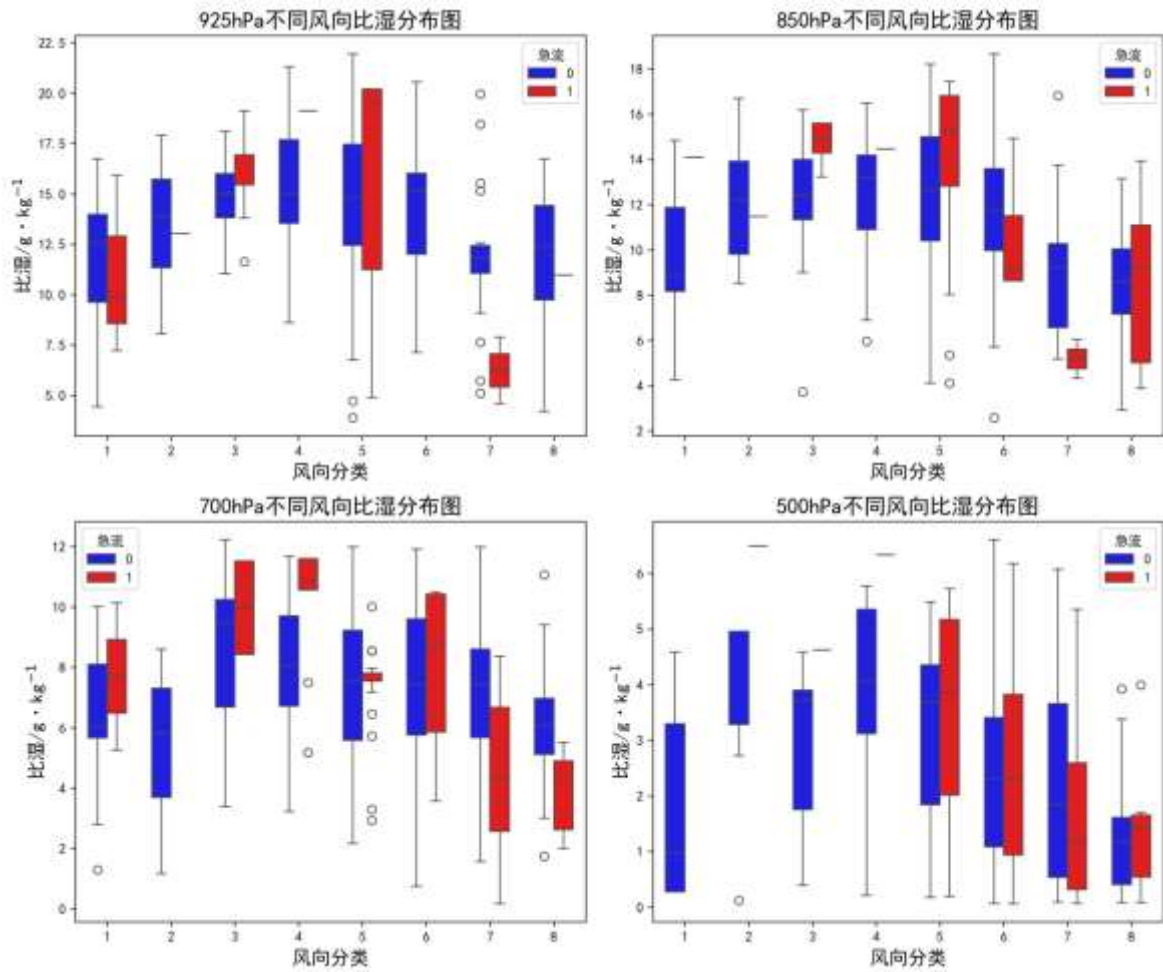
图 13 2016—2023 年暴雨、小雨、无雨 500 hPa、700 hPa、850 hPa、925 hPa 比湿时序图

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 from 2016 to 2023

2.2.4 不同风向比湿特征分析

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。将各层风向分成 8 个方向， $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 、 $90^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 、 $135^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 、 $180^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 、 $225^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 、 $270^{\circ}\sim 315^{\circ}$ 、 $315^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ，分别用 1~8 代表，表示东北北（ENN）、东北东（ENE）、东东南（EES）、南南东（SSE）、南南西（SSW）、西西南（WWS）、西西北（WWN）、北北西（NNW）风，定义风速 $\geq 12\text{m/s}$ 为急流。各层比湿分布如图 14， $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ （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 最大比湿中位数是 19.55 g/kg ，出现在风向 $180^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 区间，其次是风向为 $135^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 区间有急流时比湿为 19.13 g/kg ；出现东南急流时（风向区间 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ），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 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向区间有较大的比湿有无急流中位数分别为 6.49 、 4.95 g/kg 。风向为 $270^{\circ}\sim 315^{\circ}$ 、 $315^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 两个区间（西北风）各层比湿均明显下降，有急流时比湿较无急流时比湿更小，因为西北风为干冷空气，风速越大，

361 水汽越小。
 362
 363



364
 365 注：箱线图中触须的上端和下端分别代表统计
 366 最大值和最小值；箱体内部三条横线自下而上 分别代表第 25%、 50%和 75%分位值。
 367

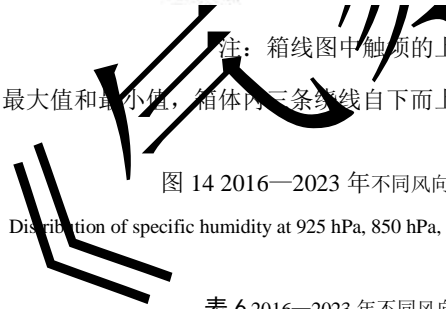


图 14 2016—2023 年不同风向 925、850、700、500 hPa 比湿分布

Fig. 14 Distribution of specific humidity at 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, and 500 hPa at different wind directions from 2016 to 2023

370
 371 表 6 2016—2023 年不同风向比湿分布特征（单位：g/kg）
 372

Table 6 Distribution characteristics of specific humidity at different wind directions from 2016 to 2023 (unit: g · kg⁻¹)

层次/ hPa	有无急流	0~45°	45°~90°	90°~135°	135°~180°	180°~225°	225°~270°	270°~315°	315°~360°
925	急流	9.88	13.04	16.94	19.13	19.55	/	6.23	10.97
	无急流	12.55	13.89	15.06	15.06	14.78	15.16	11.85	12.39
850	急流	14.1	11.48	14.92	14.46	15.3	9.16	5.18	9.24
	无急流	8.84	12.22	12.41	13.23	12.65	11.74	9.24	8.61
700	急流	7.7	/	9.97	10.85	7.54	8.73	4.32	4.41
	无急流	6.06	5.84	9.47	8.03	7.54	7.44	7.44	6.08

500	急流	/	6.49	4.62	6.33	3.85	2.31	1.17	1.42
	无急流	0.97	4.95	3.72	4.06	3.69	2.31	1.84	1.17

373

374 蒙古低涡低槽型暴雨 500 hPa 风向以西南风主，比湿也较其他风向大，西北风最小；925~700
 375 hPa 以东南风与西南风为主，常伴有低空急流，中位数比湿最大值出现在西南低空急流中。副高
 376 及西风槽型暴雨，500 hPa 主要集中在西南风象限，西西南风伴有急流值时最大，中位数大于 2.5
 377 g/kg，最大值大于 6.0 g/kg；700 hPa 与 500 hPa 类似，比湿大值区仍然是西南风伴有急流的情况；
 378 925~850 hPa 各象限均有分布，南南东风比湿中位数大于西南风中位数，说明东南风水汽含量更
 379 高。河套低涡型暴雨 500 hPa 风向主要集中在西南风，有时伴有大于 12 m/s 的急流，比湿较其他
 380 风向大；中低层以东南风比湿最大。台风暴雨 925~500 hPa 以东北风及东南风为主，比湿中位数
 381 最大值出现在东南风。西风槽与台风结合型暴雨 500 hPa 风向以东南风与西南风为主，比湿中位
 382 数最大值出现在西南风中，925-700 hPa 有也有类似的结果；比湿中位数最大值 850~700 hPa 出现
 383 在西南风中，925 hPa 出现在东南风中。东北冷涡型暴雨 500 hPa 主要集中在西北风象限，比湿比
 384 较小，风越大比湿越小；925~700 hPa 比湿最大值出现西南风，几次过程中未出现急流。

385 以上分析比较零散，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
 386 北京 6 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
 387 的参考指导作用。

表 7 2016—2023 年北京不同类型暴雨高空比湿特征参考表（单位：g/kg）

Table 7 Reference table of high-altitude specific humidity characteristics of different types of torrential rain events in Beijing from 2016 to 2023 (unit: g·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	12.00~16.68	11.85~16.4	9.17~13.80	15.44~17.44	13.29~16.30	14.15~17.04
850	9.71~4.51	9.461~4.32	11.37~14.15	6.14~12.55	13.04~14.92	10.27~14.21	12.25~14.92
700	5.03~2.73	5.80~7.08	7.049~.47	4.686~.55	9.67~11.52	5.95~9.31	7.44~10.42
500	1.17~3.44	0.95~4.29	2.164~.37	0.52~3.41	4.155~.77	1.35~4.30	3.16~5.17
200	0.01~0.05	0.01~0.05	0.02~0.05	0.00~0.02	0.04~0.08	0.01~0.03	0.02~0.08

391 注：区间表示 25%~75%分位数。

392 2.2.5 比湿统计显著检验

393 对 83 d 暴雨过程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
 394 性检验（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

395 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
 396 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
 397 效，可排除随机波动影响。6 类暴雨的暴雨时段与非暴雨时段只有热带气旋 200 hPa、热带气旋
 398 500 hPa、河套低涡 500 hPa 比湿通过了 P 值为 0.05 的显著性水平检验，其他均未能通过显著性水
 399 平检验。6 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。可能是因为分类后样本
 400 过少导致没有通过显著性水平检验。但这依然反映了不同天气背景下的物理量配置趋势，可供业
 401 务参考。

402 表 8 2016—2023 年所有暴雨过程暴雨时段与非暴雨时段显著性水平检验结果

403 Table 8 Results of significance level tests for torrential rain periods and non-torrential rain periods of all heavy rainfall processes from 2016 to
 404 2023

层次/hPa	暴雨时段样本数	非暴雨样本数	暴雨时段 t 值	暴雨时段 P 值	显著性
925	384	143	3.424	0.000666	显著
850	386	143	5.587	3.92e-08	显著
700	388	142	4.914	1.13e-06	显著
500	386	146	8.764	2.55e-17	显著
200	373	143	0.122	0.903	不显著

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

408 Table 9 Results of significance level tests for specific humidity of widespread and non-widespread torrential rain events from 2016 to 2023

层次/hPa	大范围暴雨样本数	非大范围样本数	大范围 t 值	大范围 P 值	显著性
925	128	399	5.905	6.33e-09	显著
850	128	401	7.021	6.82e-12	显著
700	130	400	9.452	1.08e-19	显著
500	135	397	7.226	1.75e-12	显著
200	124	392	-1.128	0.26	不显著

412 3 讨论

413 (1) 不同类型暴雨 500 hPa 比湿不同的原因

414 高空水汽大小主要取决两个因素，一个是平流作用将水汽源地输送到暴雨区，另一个是垂
 415 直上升运动将低层水汽带到上空。500 hPa 高度位于 5000 多米，一般情况水汽含量少，比湿小。
 416 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。
 417

418 热带气旋(台风)型暴雨由于从地面至 500 hPa 北京上空均为一致的东南风，风速常大于 12
419 m/s，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
420 500 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
421 中位数达 5.08 g/kg。如 2023 年 7 月 29 日-8 月 1 日受台风“杜苏芮”残涡、副高、卡努台风共同影
422 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
423 涡附近有强烈的上升运动和地形抬升运动，500 hPa 的比湿大于 5.0 g/kg。

424 河套低涡型暴雨北京上空 850~500 hPa 受低涡前西南气流或东南气流控制，700 hPa 及以
425 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
426 旋(台风)型暴雨相对较弱，暴雨时段比湿中位数达 3.68 g/kg。

427 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型暴雨过程，500 hPa 水
428 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。

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

431 (2) 500 hPa 比湿是暴雨预报关键指示因子的原因

432 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
433 沛、大气可降水量 (PWAT) 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
434 更有利的条件。所有暴雨过程、不同月份暴雨过程、6 类暴雨过程，不同降水量级 (暴雨、小雨、
435 无雨) 各层比湿均有类似结果，在中层 (如 500 hPa) 水汽条件已满足 (例如比湿 > 12 g/kg) 的
436 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
437 报业务工作中，不需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
438 层湿度增加更有利暴雨形成与维持。

439 (3) 500 hPa 比湿在业务中应用注意事项

440 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。
441 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
442 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
443 500 hPa 比湿较实况明显偏大，则会出现暴雨空报风险。

444 4 结论

445 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

446 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，统计分析了不同月份、不同
447 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：

448 (1) 根据 500 hPa 环流形势，北京暴雨分为 6 类：比湿从大到小依次热带气旋类、河套低涡
449 类、副高与西风槽结合类、蒙古低涡低槽类、副高与西风槽结合类、东北低涡类。前两类（热
450 带气旋类、河套低涡类）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。

451 (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，
452 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
453 非暴雨时段。500 hPa 比湿暴雨预报具有很好的指示作用。

454 (3) 暴雨、小雨、无雨三种天气情况，各层比湿暴雨最大、其次是小雨，无雨比湿最小，
455 变化最明显仍是 500 hPa 比湿。

456 (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 ($\geq 12 \text{ m/s}$) 925、850、
457 700、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
458 最小。

459 (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
460 种比湿特征的统计分析，700 hPa 以下比湿特征及阈值是暴雨预报的重要水汽因子，本研究结果
461 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
462 要 500 hPa 有丰富水汽条件。

463

464 参考文献：

465 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,
466 2021. Characteristics of specific humidity in South China and its relationship with rainstorm[J]. Meteor Environ Sci, 44(2): 33-42 (in
467 Chinese).

468 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
469 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
470 June 2017[J]. Meteor Mon, 45(9): 1213-1226 (in Chinese).

471 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,
472 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
473 Mon, 45(5): 606-620 (in Chinese).

474 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,
475 Li G P, et al, 2025. Statistical analysis on classification of synoptic circulation of warmsector heavy rainfall and its ambient parameters in
476 Huizhou during the first rainy season[J]. Meteor Mon, 51(4): 473-483 (in Chinese).

477 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,
478 2022. Causes and precipitation microphysical characteristics of localized heavy rainstorm in western Shandong based on multi-source
479 data[J]. Meteor Mon, 48(11): 1475-1486 (in Chinese).

480 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):

481 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
482 one continuous heavy rain event in South China[J]. Meteor Mon, 40(1): 18-27 (in Chinese).

483 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
484 humidity change over China during 1958-2005[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1): 1-12 (in Chinese).

485 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,
486 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].
487 Meteor Mon, 47(4): 412-423 (in Chinese).

488 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):
489 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
490 impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(12): 1497-1511 (in
491 Chinese).

492 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
493 al, 2007. Evolution characteristics of vapor over Wuhan in Meiyu period in 2004 and its relationship with heavy rainfall[J]. Meteor Mon,
494 33(2): 3-9 (in Chinese).

495 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,
496 Nong M S, et al, 2019. Analysis on the spatiotemporal difference of rainfall in a Guangxi late autumn rainstorm event[J]. Torr Rain Dis,
497 38(1): 7-16 (in Chinese).

498 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(2): 301-310. Lu Y R, Gao G D, 1984. The
499 water vapour content and the water budget in the atmosphere over China[J]. Acta Meteor Sin, 42(2): 301-310 (in Chinese).

500 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
501 al, 2009. Water vapor analysis of heavy rain events in Guangxi in July 2004[J]. Meteor Mon, 35(8): 61-69 (in Chinese).

502 聂云, 周继先, 顾欣, 等, 2018. “6.18”梅雨锋西段黔东南大暴雨个案诊断分析[J]. 暴雨灾害, 37(5): 445-454. Nie Y, Zhou J X, Gu X,
503 et al, 2018. Diagnostic analysis of a torrential rain event occurred along western Meiyu front in Qiandongnan on 18 June 2015[J]. Torr
504 Rain Dis, 37(5): 445-454 (in Chinese).

505 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,
506 Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan
507 Province[J]. Meteor Mon, 48(5): 533-544 (in Chinese).

508 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.
509 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
510 July 2012 extremely severe rainstorm in Beijing[J]. Meteor Mon, 41(4): 389-400 (in Chinese).

511 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,
512 Zhang Y T, 2019. Analysis of moisture source and transport pathways of a rainstorm with tropical cyclone in Nanchang[J]. Meteor Mon,
513 45(10): 1392-1401 (in Chinese).

514 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,
515 Yang L M, 2021. Climatic characteristics of atmosphere specific humidity in Xinjiang from 1961 to 2018 based on radiosonde observation
516 data[J]. Desert Oasis Meteor, 15(3): 77-84 (in Chinese).

517 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,
518 Huang Y F, 2022. Advances and prospects on the study of precipitation in the Three-River-Source Region in China[J]. Trans Atmos Sci,
519 45(5): 688-699 (in Chinese).

520 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.
521 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):
522 342-350 (in Chinese).

523 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. Zeng
524 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

525 Meteor Res Appl, 28(4): 1-4, 7 (in Chinese).

526 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

527 al, 2022. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12): 1421-1434 (in

528 Chinese).

529 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):

530 467-472. 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

531 Technol (Nat Sci Ed), 17(5): 468-472 (in Chinese).

532 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,

533 et al, 2014. Characteristics of water vapor flux in autumn and its relationship with precipitation in Yunnan[J]. Meteor Mon, 40(3): 336-348

534 (in Chinese).

535 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

536 G, et al, 2025. Water vapor transport characteristics during rainstorms in different regions of Helan Mountains[J]. Meteor Mon, 51(3):

537 285-297 (in Chinese).

538 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,

539 2008. Diagnoses analysis of physical characteristic changes of tropical storm Haima before and after its transformation[J]. Meteor Mon,

540 34(3): 49-55 (in Chinese).

541 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

542 change of atmospheric water vapor in China[J]. Quart J Appl Meteor, 8(3): 341-351 (in Chinese).

543 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

544 Q, et al, 2018. Forecast error analysis of extremely heavy rain under high-level Northwest flow[J]. Meteor Mon, 44(1): 93-106 (in

545 Chinese).

546 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

547 basic features of distribution of water vapour content and their controlling factors in China[J]. Acta Geogr Sin, 36(4): 377-391 (in

548 Chinese).

549 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.

550 Held I M, Soden B J, 2000. Water vapor feedback and global warming[J]. Annu Rev Energy Environ, 25(1): 441-475.

551 Kiehl J T, Trenberth K E, 1997. Earth's annual global mean energy budget[J]. Bull Amer Meteor Soc, 78(2): 197-208.

552 McCarthy M P, Thorne P W, Titchner H A, 2009. An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes[J]. J Climate, 22(22):

553 5820-5838.

554 Paltridge G, Arking A, Pook M, 2009. Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data[J]. Theor Appl

555 Climatol, 98(3): 351-359.

556 Trenberth K E, Stepaniak D P, 2003a. Covariability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and interannual

557 timescales[J]. J Climate, 16(22): 3691-3705.

558 Trenberth K E, Stepaniak D P, 2003b. Seamless poleward atmospheric energy transports and implications for the Hadley circulation[J]. J

559 Climate, 16(22): 3706-3722.

563
564
565

