

高晓梅,俞小鼎,王世杰,等,2026. 山东触发对流天气的干线特征研究[J]. 气象,52(10):1165-1177. Gao X M, Yu X D, Wang S J, et al, 2026. Research on the features of drylines triggering convective weather in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 52(10): 1165-1177(in Chinese).

山东触发对流天气的干线特征研究^{*}

高晓梅¹ 俞小鼎² 王世杰¹ 封雅琼¹ 王新红¹ 王文波¹

¹ 山东省潍坊市气象局, 潍坊 261011

² 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 利用常规高空和地面观测、多普勒雷达、卫星云图和 ERA5 再分析等资料, 对 2001—2022 年山东干线和触发对流干线等个例进行分析。结果表明: 2001—2022 年期间山东干线总日数达 451 d, 其中触发对流干线总日数为 156 d。触发对流干线出现在 4—9 月, 5 月和 5 月上旬分别是干线出现最多的月份和旬, 14—17 时(北京时间)是主要出现时段。干线主要分布在鲁中、鲁西北地区, 其形成与山脉作用及海陆分布有关。触发对流干线和无对流干线的宽度分别为 75~106 km, 80~114 km, 露点温度梯度分别为 $11.8\sim 16.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$, $9.8\sim 15.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。两类干线的干湿两侧温度分布在 $23\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度梯度为 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$, 干侧温度略高。相比无对流干线, 触发对流干线的干湿两侧温度和露点温度更高, 宽度更小, 露点温度水平梯度值更大, 这与力管项环流在此时更强有关。对山东干线触发对流的关键环境参数阈值进行了统计, 发现能量类和层结稳定度类等对流参数均具有一定可区分性, 深层(0~6 km)垂直风切变也具有可区分性, 低层(0~1 km, 0~3 km)垂直风切变因差距较小难以区分; 不稳定条件的对流参数季节差别不大, 但水汽条件的环境参数与 0~6 km 垂直风切变等季节差异较大, 因此应分季节区分其阈值。山东干线多发生在高空 500 hPa 为西北气流、西风槽前和东北低涡形势下, 低空 700 hPa, 850 hPa 主要受低涡切变线或西北气流影响, 边界层多伴有辐合线, 地面主要处在低压底部或前部的辐合流场或大陆暖低压影响下。

关键词: 干线, 时空分布, 干线结构, 环境参数, 对流

中图分类号: P445, P434

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.041602

Research on the Features of Drylines Triggering Convective Weather in Shandong Province

GAO Xiaomei¹ YU Xiaoding² WANG Shijie¹ FENG Yaqiong¹ WANG Xinhong¹ WANG Wenbo¹

¹ Weifang Meteorological Office of Shandong Province, Weifang 261011

² CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Using conventional upper-air and surface observations, Doppler radar data, satellite nephogram and ERA5 reanalysis data, this paper analyzes drylines cases and drylines triggering convections in Shandong Province from 2001 to 2022. The results are as follows. The total number of days with drylines in Shandong from 2001 to 2022 is 451 d, of which there are 156 d with convective drylines, respectively. Convective drylines occur mainly from April to September. May and the first dekad of May are the month and dekad periods to have the highest occurrence frequency of drylines, respectively. Drylines mainly occur between 14:00 BT and 17:00 BT in the afternoon, distributed often in central and northwestern Shandong. The formation of drylines is related to the influence of mountain ranges and the distribution of land and sea. The widths of convective and non-convective drylines are 75—106 km and 80—114 km respectively,

^{*} 国家自然科学基金项目(41775044)、山东省自然科学基金项目(ZR2023MD118)、山东省自然科学基金创新发展联合基金项目(ZR2024LQX009)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J015)共同资助

2025 年 11 月 23 日收稿; 2026 年 4 月 16 日收修定稿

第一作者: 高晓梅, 主要从事灾害性天气预报技术研究. E-mail: wfmeizi@126.com

通讯作者: 俞小鼎, 主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究. E-mail: xdyu1962@126.com

with dew point temperature gradients being $11.8\text{--}16.7\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ and $9.8\text{--}15.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ respectively. Temperatures on both dry and wet sides of drylines vary from 23°C to 33°C , with a temperature gradient of $1\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$, and temperature on the dry side is slightly higher. Compared to non-convective drylines, convective drylines exhibit higher temperatures and dew point temperatures on both the warm and cold sides, narrower widths, and greater dew point temperature gradients. This is because the circulation associated with the force-driven component becomes stronger when the horizontal dew point temperature gradient is large. The thresholds of the key environmental parameters for drylines triggering convections reveal that the convective parameters such as energy and stratification stability all exhibit a certain degree of distinguish ability. The vertical wind shear in the deep layer ($0\text{--}6\text{ km}$) is also distinguishable, whereas vertical wind shear in the lower layers ($0\text{--}1\text{ km}$ and $0\text{--}3\text{ km}$) is difficult to distinguish due to the small differences. The seasonal variation in convective parameters under unstable conditions is relatively small, but environmental parameters related to moisture conditions and $0\text{--}6\text{ km}$ vertical wind shear exhibit significant seasonal differences, so their thresholds should be differentiated by season. Drylines frequently develop under conditions of northwest airflow, ahead of westerly trough, and north-east low-pressure vortex at 500 hPa . At the lower 700 hPa and 850 hPa , drylines are primarily influenced by the shear line of the low-pressure vortex or the northwest airflow, with the boundary layer often accompanied by convergence lines. The surface primarily lies within the convergence flow field of continental warm low pressure or at the bottom or front of low-pressure systems.

Key words: dryline, spatio-temporal distribution, dryline structure, environmental parameter, convection

引 言

强对流天气具有突发性和局地性强、历时短、天气剧烈、致灾严重等特点,是导致气象灾害的重要天气类型(郑永光等,2010;俞小鼎等,2012;孙继松等,2014;王秀明等,2014;俞小鼎和郑永光,2020)。其主要包括雷暴大风、冰雹、短时强降水和龙卷,是对流层尤其对流层中下层条件不稳定、水汽、垂直风切变以及中小尺度抬升共同作用的结果,在预报上具有很大的不确定性,其发生、发展规律及形成机制越来越受到气象工作者的重视(孙继松和陶祖钰,2012;戴建华等,2012;王秀明等,2015;陶岚等,2016;郑永光等,2017;2025;张小玲等,2019;张一平等,2022;俞小鼎等,2024;何娜等,2025)。边界层辐合线是在地面附近触发对流的主要中尺度系统之一,主要包括冷锋、干线、阵风锋、海风锋以及其他类型的辐合线(俞小鼎等,2020)。干线特征是其两侧有对比强烈的露点温度或比湿,温度差异不如露点温度明显,同时伴随暖干气流和暖湿气流之间的辐合(汇合),其对应的低层较强上升气流是雷暴和强对流的重要触发机制之一。

20 世纪 70 年代末雷雨顺等(1978)研究表明强

对流天气更易出现在能量锋区附近,其中能量锋区包括静止锋、冷锋、暖锋和干线。孙淑清和孟婵(1992)发现北京出现的一次暴雨过程中干线形成和发展的原因是下沉气流增温且东扩,这是中国首次针对干线的研究。2010 年之后,随着我国强对流天气预报预警业务加强,许多学者对典型干线个例进行了分析和研究。王秀明等(2012;2015)研究了黄淮地区一次干线触发对流的个例和东北龙卷的环境条件,指出其主要由伴随干线的汇合流场导致的地面附近的辐合线所触发,且发现雷暴沿着干线的湿空气一侧发展。Qin and Chen(2017)对北京的一次强对流个例进行分析,指出其由干线和冷锋合并后触发导致。张桂莲等(2019)对内蒙古东南部一次致灾飑线天气过程进行分析,发现干线和中尺度辐合线长时间维持、耦合并加强成为这次强对流天气的直接触发和维持机制。Bai et al(2019)研究了豫北平原的一次强对流过程,发现强对流的发生主要是前期雷暴下沉气流形成的扇状阵风锋冲到山下与山下的干线相交汇造成。上述都是针对典型干线个例进行分析和研究,在区域性的干线时空分布规律特征研究方面,也有学者进行了相关系统性研究。方祖亮等(2020)对东北地区 2003—2017 年暖季干线的环境要素、时空分布及有无触发对流干线的环境

参数进行了统计分析。张一平等(2021)统计分析了河套地区 52 次触发对流的干线个例,主要包括时空分布、干线两侧气象要素、影响系统以及环境参数等。王金兰等(2021)对 2010—2019 年暖季黄淮地区触发对流天气的 16 次干线个例特征进行了分析,统计了其多发区域、环流系统、地面和高空要素场特征等。这些工作标志着我国对干线的研究开始向系统性研究方向迈进。

山东地势中部高四周低,泰山、鲁山、沂山为鲁中山地的主体,东部和南部为低山丘陵,西部和北部为平原。每年春夏之交,山东均会出现多次较强的强对流天气,冰雹、雷暴大风、局部龙卷和短时强降水有时同时发生,给当地造成严重的经济损失(高晓梅等,2018a)。特别是近年来,山东强对流天气频发(高晓梅等,2018b;侯淑梅等,2023;高帆等,2023;曹艳察等,2026),但目前为止对山东干线的发生频率、时空分布以及触发对流的特征等系统性研究几乎是空白,本文利用 2001—2022 年共 22 年常规高空地面观测、ERA5 再分析、卫星云图以及多普勒雷达等资料,对山东干线的时空分布、干线结构、干线触发深厚湿对流的有利流型配置以及关键环境参数分布等特征进行研究,以期为今后山东干线触发对流和强对流预报预警业务提供支撑。

1 资料和方法

1.1 资料

资料来源于 2001—2022 年国家级地面观测站常规高空和地面观测、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5 再分析、卫星云图以及多普勒雷达等资料。山东干线是否触发对流的判断主要基于观测站点的雷暴和重要天气报、气象卫星和天气雷达等资料。

1.2 触发对流的干线选取标准和研究方法

本文干线的界定标准和方祖亮等(2020)标准一致,即干线露点温度水平梯度 $\geq 6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,且午后温度达最高时,干空气一侧温度通常略高于湿空气一侧,对持续时间较短(干线结构维持时间 $< 3\text{ h}$)的干线不考虑。这主要考虑到国内预报业务人员常用地面百叶箱露点温度表示地面附近大气湿度

条件,且山东地形和地势条件与上述学者研究的区域在一定程度上相似。

按照上述标准,普查 2001—2022 年每天的地面实况资料,挑选出山东触发对流天气的干线个例。个例选取的条件:地面实况图上现在、过去等天气现象有雷阵雨或阵雨(因 2014 年之后全国取消雷暴观测,已没有雷阵雨记录,但地面实况必须有阵雨,且在全省雷电监测网上有闪电记录),并且在干线附近露点温度等值线密集带或其两侧 50 km 的范围内出现对流云团。按照干线结构维持时间 $\geq 3\text{ h}$ 的标准,干线一般在一天之内出现多个时次,因此用“日数”表征干线出现频率。山东干线的识别主要采用主客观结合的方法。干线的判别、宽度和长度定义与方祖亮等(2020)一致。在排查干线时,为排除受地形影响较大的虚假干线,必须在地面实况图上叠加高分辨率的地形图。另外要排除由非降水区形成的强湿度梯度带与降水所产生的降温增湿而形成的虚假干线。

2 干线的时空分布和结构特征

2.1 干线的时空分布

2.1.1 干线的年际变化特征

按照以上筛选标准,经普查发现山东干线均出现在每年的 4—10 月。2001—2022 年山东干线总日数为 451 d(图 1),年平均为 20.5 d,发生频率为 9.8%,低于方祖亮等(2020)分析的东北地区(15.5%)。其差异主要是由两个区域的天气气候特征不同及统计的区域面积大小不同所造成。触发对流干线的总日数为 156 d(图 1),年平均为 7.1 d,发生频率为 3.4%。从年际变化来看,2001—2022 年期间,山东干线和触发对流干线均是 2016 年最多、2001 年最少。

2.1.2 干线的季节变化特征

山东干线出现在每年 4—10 月,其中 5 月是最多的月份(图 2a),占干线总数的 30.6%;4—5 月合计超过干线总数的 60%,10 月最少,仅占 0.4%。触发对流干线出现在 4—9 月,其中 5 月也是最多,占总数的 28.2%,其次为 6 月,占总数的 23.1%,7 月最少,仅占 7.1%。综上,5 月是山东出现干线和触发对流干线最多的月份。这主要因为 5 月是高

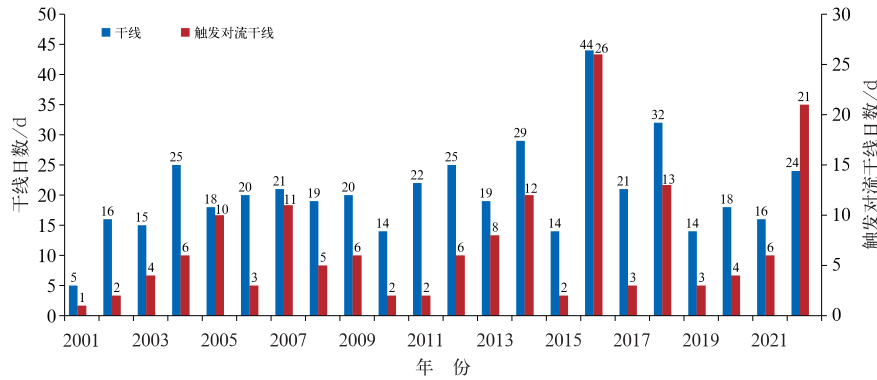


图 1 2001—2022 年山东干线和触发对流干线日数的年际变化

Fig. 1 Interannual variation in the number of days of drylines and drylines triggering convections in Shandong Province during 2001—2022

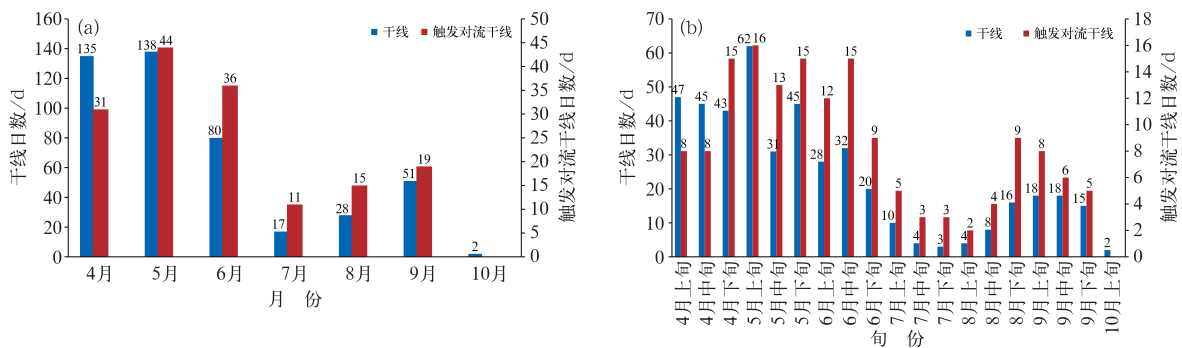


图 2 2001—2022 年山东干线和触发对流干线日数的(a)月变化和(b)旬变化

Fig. 2 (a) Monthly and (b) dekad variations in the number of days of drylines and drylines triggering convections in Shandong Province during 2001—2022

空冷涡、高空槽后西北气流的多发月份,山东低层主要受西南气流影响,来自东海和黄海的水汽在山东辐合,因此干线发生频率高。另外,统计发现,4月出现总干线数比6月多,但触发对流干线较6月少。这是因为触发对流干线数与温度关系密切,4月在山东是乍暖还寒的月份,常年平均气温为 14°C ,而5—6月平均气温均在 20°C 以上,温度较高,有利于大气不稳定能量积累,特别是由于温度升高较快而冷空气活动也较频繁,因此大气层结极不稳定、易触发对流天气。

从旬变化来看,山东干线出现最多在5月上旬(图2b),占干线总数的13.7%;其次是4月上旬,占10.4%;7月中旬和下旬、8月上旬、10月上旬,山东干线出现频数都很少,合计只占2.9%。触发对流干线也是最多出现在5月上旬,占触发对流干线总数的10.3%;其次为4月下旬、5月下旬和6月中旬,均占9.6%;8月上旬最少,只占1.3%。综上,5月和5月上旬是山东干线和触发对流干线出现最多的月份和旬。

2.1.3 干线的日变化和生命史特征

日分布显示(图3),2001—2022年山东干线主要集中在出现在下午(14—17时,北京时,下同),占干线总数的49.4%,夜间最少,仅占3.5%。触发对流干线也是主要集中在出现在下午,占总数的54.5%,夜间最少,仅占3.2%。综上,山东干线和触发对流干线均集中出现在14—17时,夜间最少。这主要与夜间温度较低,但露点温度与白天差别不大,因此对流有效位能(CAPE)相对白天明显较小,而对流抑制(CIN)由于夜间辐射逆温形成而明显增大等原因有关。另外,上午出现干线的频次比傍晚高,这与上午一般湿度较大较易形成干线有关。

对干线的生命史特征进行了分析(图略),发现2001—2022年山东干线平均生命史时长为6.7 h,最大为24 h,发生在2003年6月20日;最小为3 h,发生在2002年7月15日;干线最显著的时段为14—17时,其次为17—20时。触发对流干线平均生命史时长为7.5 h,最显著的时段同样是14—17时。

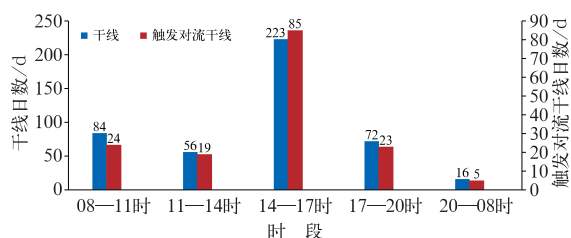


图 3 2001—2022 年山东干线和触发对流干线日数的日变化

Fig. 3 Diurnal variation in the number of days of drylines and drylines triggering convections in Shandong Province during 2001–2022

2.1.4 干线的空间分布特征

根据出现区域不同,将 2001—2022 年山东出现的 451 d 干线大致分为鲁西北(聊城、德州、滨州一带)、鲁中(济南、淄博、潍坊、泰安、济宁北部一带)、鲁南(临沂、枣庄、济宁南部、菏泽一带)和其他(包括鲁东南和胶东半岛)等区域。

从图 4a 可以看出,鲁中的济南、潍坊干线出现日数最多;鲁西北的德州、聊城次之;济宁 130 d 干线中有 102 d 出现在济宁北部;临沂 142 d 干线中有 96 d 出现在与淄博南部接壤的临沂北部;胶东半岛(青岛、烟台和威海)和鲁东南(日照)出现干线的日数较少。从触发对流干线日数的分布看(图 4b),鲁西北的德州最多,鲁中的潍坊次之;鲁中的济南和鲁西北的聊城、滨州也较多;胶东半岛和鲁东南最少。

可见,山东干线和触发对流干线主要分布在鲁中、鲁西北地区,胶东半岛和鲁东南均最少,这主要由于海陆分布和地形共同影响,使得山东干线较东北地区的干线分布呈现更复杂的分布特征和走向。山东地处中纬度,其气候受地形影响显著。鲁

西北西侧为太行山脉,鲁中西侧为泰沂山脉,对流层中层常年盛行偏西气流,其越山下沉形成的干暖气流与来自东海和黄海的暖湿气流之间易形成干线,伴随偏西风 and 东南风(或偏东风)之间的气流汇合。特别是暖季,在副热带高压控制下,偏西气流越过山脉下沉形成的干暖气团与来自黄海(有时包括东海)的低层暖湿气流之间易形成干线。因此山东出现对流的干线大部分由越过太行山脉(鲁西北)或泰沂山脉(鲁中)的大陆性气团与来自东海和黄海的偏南暖湿气流交汇形成。干且冷的气流下山时,由于晴空辐射升温 and 干绝热下沉升温的共同作用,使气团升温显著形成干暖气团,与来自黄海和东海的暖湿气流相比,其温差不明显或更高,但湿度差异显著。因此,位于鲁西北或鲁中地区的干线较多。综上,山东干线的形成除了山脉作用外,也受到高空冷涡、切变线和海陆分布的影响。

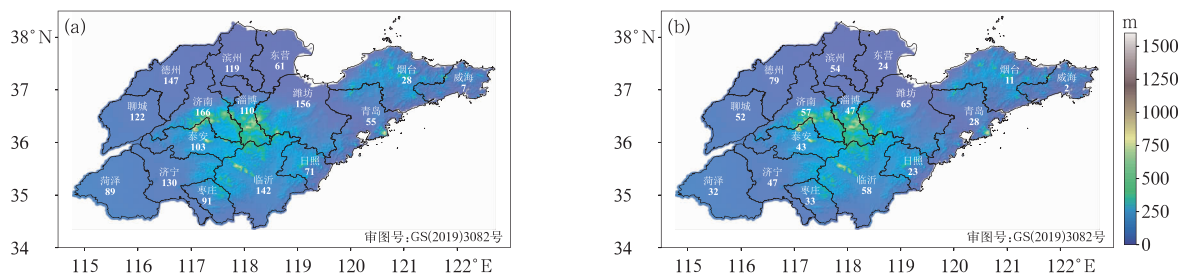
统计干线的走向发现,山东干线走向主要为经向(南北向)分布,大部分呈东北—西南走向或准南北向(图略)。同时干线的伸展长度差异也较大,短的为 100~200 km,主要出现在鲁西北地区,长的可达 700~800 km,横贯整个山东。其中,5—6 月主要为长度超过 400 km 的较长干线,7—8 月则为 400 km 以下的较短干线(表略)。

2.2 干线的结构特征

干线的结构特征一般从干线的宽度、湿度、温度和气压等要素进行分析。

2.2.1 干线的宽度特征

2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的宽度均值分别为 95 km、105 km(图 5a),中位



注:填色为地形。

图 4 2001—2022 年山东(a)干线和(b)触发对流干线日数的空间分布(数字,单位:d)

Fig. 4 Spatial distributions in the number of days of (a) drylines and (b) drylines triggering convections in Shandong Province during 2001–2022 (number, unit: d)

数分别为 91 km、96 km, 25%~75%分位数分别在 75~106 km、80~114 km。干线的宽度最大值为 190 km, 出现在 2011 年 6 月 11 日和 2017 年 6 月 10 日, 宽度最小值为 38 km, 出现在 2021 年 9 月 21 日。综上, 干线宽度越小, 越有利于触发对流。

分析其原因, 环流定理可以写成如下形式 (Holton, 2004):

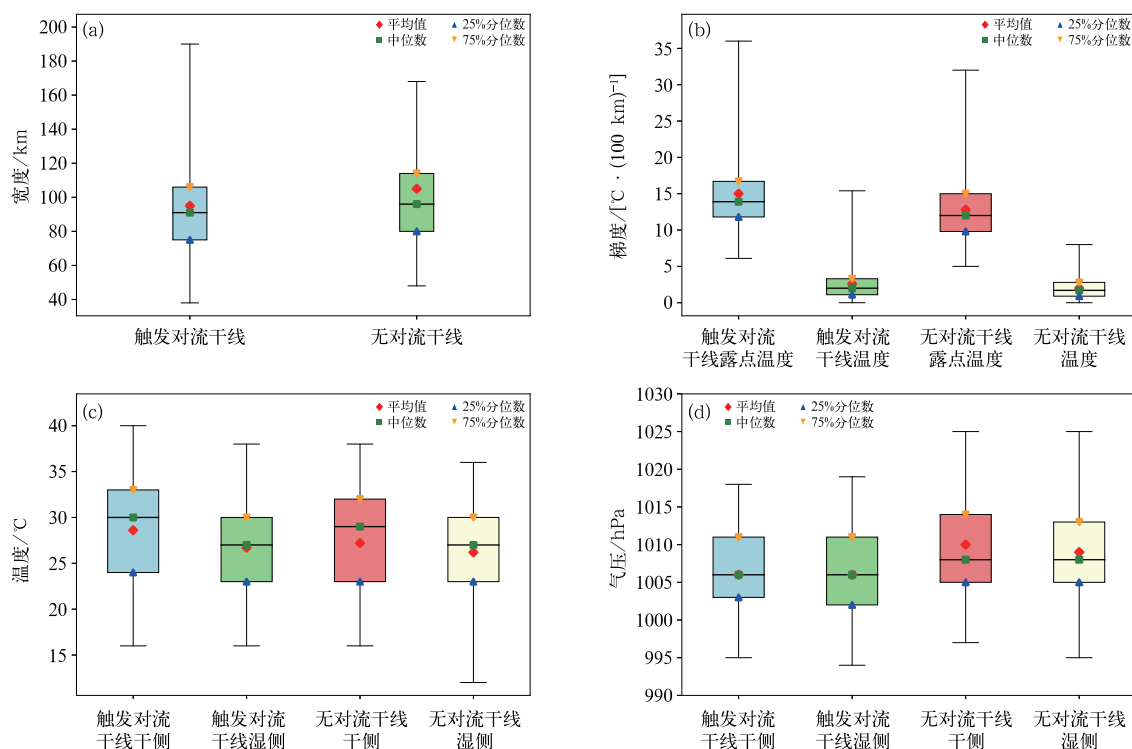
$$\frac{dC}{dt} = -\oint \frac{dp}{\rho}$$

式中: C 是沿着某一闭合线路的环流, dp/ρ 为力管项。对于正压大气, $\rho = \rho(p)$, 等密度面和等压面重合, 因此力管项的闭环积分为 0; 在斜压大气中, 力管项的闭环积分不为 0, 即只有斜压大气会驱动环流。引用理想气体公式: $\rho = p/(R_d T_v)$, 其中 R_d 为干空气的比气体常数, T_v 为虚温。而 $T_v = (1 + 0.61q)T$, 其中, T 为气温, q 为空气比湿 (因考虑到受地形起伏的影响, 后文中虚温用虚位温来表达)。由于干线两侧温度的水平梯度很小, 露点温度水平

梯度大, 露点温度高的一侧比湿大、虚位温高, 露点温度低的一侧虚位温低。触发对流干线的宽度小, 绝大多数情况下对应露点温度水平梯度大 (图 5b), 虚位温的水平梯度增加, 因此力管项加强, 导致热力直接环流 (虚位温高的气块上升, 虚位温低的气块下降, 构成闭合环流)。该环流是干线垂直环流的一部分, 因此增加了对深厚湿对流触发的抬升力, 更有利于触发对流。

2.2.2 干线的湿度特征

2001—2022 年山东干线露点温度梯度 (100 km 最大 T_d 差) 分布显示 (图 5b), 触发对流干线和无对流干线的露点温度梯度均值分别为 $15.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ 、 $12.8\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$, 中位数分别为 $13.9\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ 、 $12.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$, 25%~75%分位数分别在 $11.8\sim 16.7\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ 、 $9.8\sim 15.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ 。山东触发对流干线的露点温度梯度最大值为 $36\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$, 出现在 2004 年 5 月 22 日, 最小值为 $6\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$,



注: 箱体外部线段的最高点为最大值, 最低点为最小值, 下同。

图 5 2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的结构特征统计

(a) 宽度, (b) 温度梯度和露点温度梯度, (c) 干、湿两侧温度, (d) 干、湿两侧气压

Fig. 5 Structural characteristics of drylines in Shandong Province during 2001–2022

(a) width, (b) temperature gradient and dew point temperature gradient, (c) temperature on the dry and wet sides, (d) air pressure on the dry and wet sides

出现在 2016 年 5 月 1 日。本文干线的界定标准是干线水平露点温度梯度 $\geq 6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,但上述结果显示大部分干线露点温度梯度值较高,均值是阈值的 2 倍还多,略高于方祖亮等(2020)统计结果。这是由于露点温度梯度较小的干线即使达到阈值但在白天一般维持不到 3 h,因此达不到本文的干线选取标准。综上,相比无对流干线,触发对流干线的干湿两侧的露点温度更高、梯度更大,这说明干线的露点温度梯度越大越易触发对流,另外还与环流形势、环境条件等因素有关。

2.2.3 干线的温度特征

2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的干侧温度均值分别为 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5c),中位数分别为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$,25%~75%分位数分别在 $24\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $23\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$;触发对流干线的干侧温度更高些。两类干线对应的湿侧温度均值分别为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5c),中位数均为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$,25%~75%分位数均在 $23\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$;两类干线的湿侧温度分布基本无差别。

温度梯度分布图显示(图 5b),触发对流干线和无对流干线的均值分别为 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 、 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,中位数分别为 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 、 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,25%~75%分位数分别在 $1.1\sim 3.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 、 $0.9\sim 2.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。2001—2022 年山东触发对流干线的温度梯度最大值为 $15.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,出现在 2018 年 6 月 13 日。

综上,两类干线的干湿两侧温度均差别较小,干侧温度大多分布在 $23\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿侧温度分布在 $23\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,干侧温度的均值和中位数高于湿侧 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比于无对流干线,触发对流干线的温度梯度值略偏大,基本分布在 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,且干湿两侧的温度更高,大都在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,较高的地面气温使大气中有利于形成“下暖上冷”的条件不稳定层结,因而更易触发对流。

2.2.4 干线的气压特征

2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的干侧气压均分别为 1006 hPa、1010 hPa(图 5d),中位数值分别为 1006 hPa、1008 hPa,25%~75%分位数分别在 $1003\sim 1011\text{ hPa}$ 、 $1005\sim 1014\text{ hPa}$;两类干线的湿侧气压均值分别为 1006 hPa、1009 hPa(图 5d),中位数分别为 1006 hPa、1008 hPa,25%~75%分位数分别在 $1002\sim 1011\text{ hPa}$ 、 $1005\sim 1013\text{ hPa}$ 。即两

类干线的干湿两侧气压分布均差别不大,干侧略高于湿侧。相比于无对流干线,触发对流干线的两侧气压值更小。两类干线的气压梯度差别较小(图略),其均值和中位数均不到 $1\text{ hPa}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,25%~75%分位数仅为 $0.3\sim 1.2\text{ hPa}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。

3 干线触发对流天气的关键环境参数特征

本文对触发对流干线和无对流干线之间的环境参数进行对比分析,目的是找到能区分有无触发对流干线的关键环境参数。因 14 时前后易发生干线触发对流,因此预报业务中一般用 14 时的温度、露点温度对 08 时的探空进行订正,从而得到对流参数。考虑到绝大多数对流都在干线湿的一侧触发,因此选择位于干线湿侧的探空站点,用湿侧下午的地面温度和露点温度订正的数据,得到的个例能够基本代表干线两侧大气的环境参数。

3.1 水汽条件

深厚湿对流(雷暴)生成的一个重要要素是水汽。2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的大气可降水量(PW)均值分别为 26 mm、17 mm(图 6a),中位数分别为 25 mm、15 mm,25%~75%分位数分别在 $19\sim 31\text{ mm}$ 、 $10\sim 22\text{ mm}$ 。如果针对能触发对流的干线选择水汽条件阈值,则可以将对应的 25%分位数(19 mm)作为其阈值。

在实际业务中,由于季节变换差异,需要分不同月份进行考虑。据前文所述,山东触发对流干线的月份在 4—9 月。对本文的关键环境参数进行了月平均值比较发现,4—6 月的平均值较接近,7—9 月的值较为接近。进一步,根据山东气候特点,强对流发生的月份一般集中在 5—6 月,暴雨一般发生在 7—8 月。综上,本文对 4—6 月和 7—9 月的相关环境参数分别进行统计(表 1)。如果针对触发对流干线分季节选择 PW 阈值,则 4—6 月和 7—9 月相应的 25%分位数(14 mm、24 mm)可作为阈值。

2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的干侧露点温度均值分别为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,中位数分别为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿侧露点温度均值分别为 $18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $16.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 6b),中位数分别为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两种类型的湿侧和干侧差值的均值分别为 $11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,中位数分别为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿侧的整层水汽

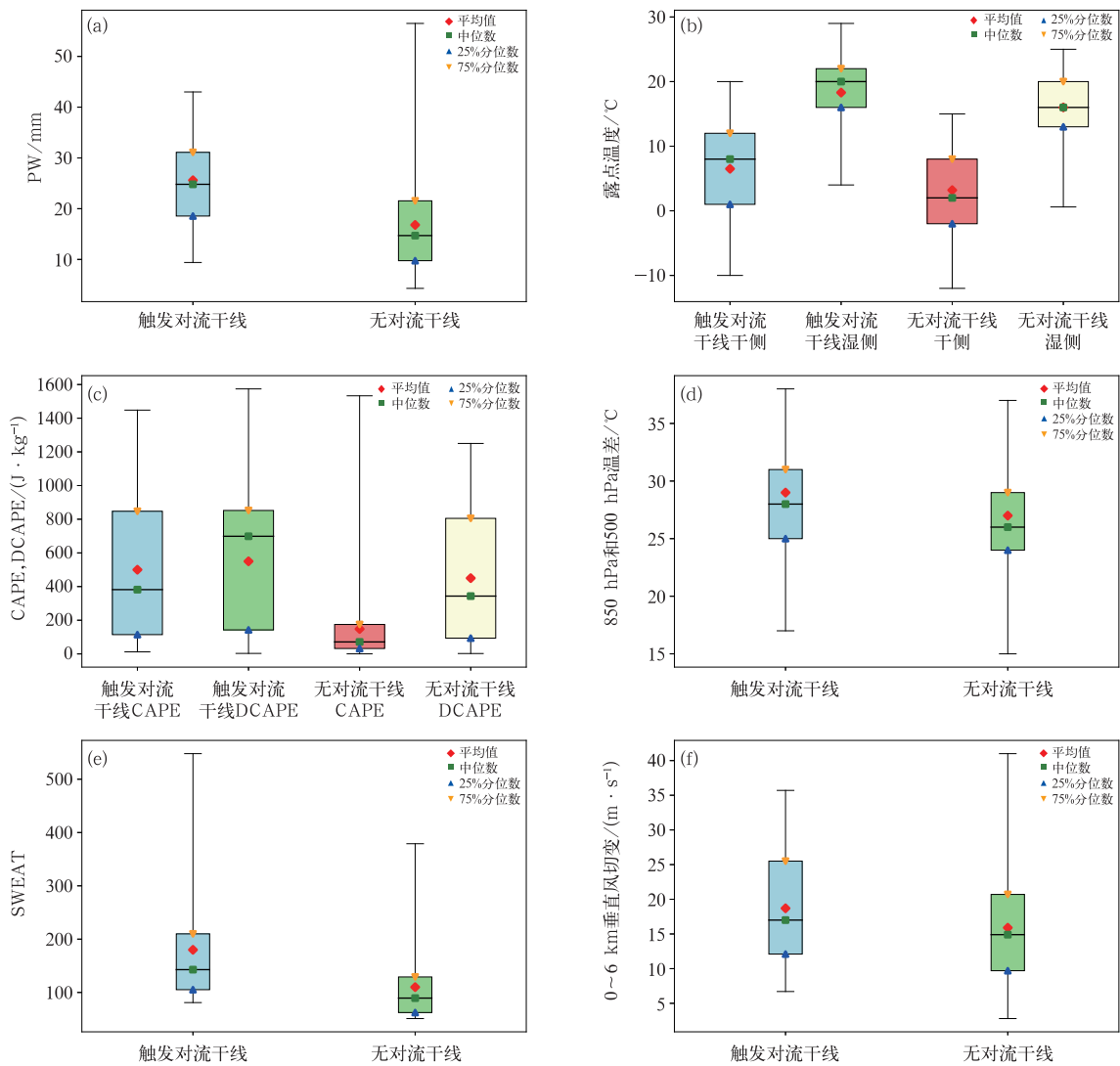


图 6 2001—2022 年山东干线的关键环境参数统计

(a)PW,(b)干、湿两侧露点温度,(c)CAPE 和 DCAPE,(d)850 hPa 与 500 hPa 温差,(e)SWEAT,(f)0~6 km 垂直风切变

Fig. 6 Key environmental parameters of drylines in Shandong Province during 2001–2022

(a) PW, (b) dew point temperature on the dry and wet sides, (c) CAPE and DCAPE, (d) temperature difference between 850 hPa and 500 hPa, (e) SWEAT index, (f) 0–6 km vertical wind shear

表 1 2001—2022 年山东触发对流干线分季节的关键环境参数统计

Table 1 Seasonal key environmental parameters of drylines triggering convections in Shandong Province during 2001–2022

环境参数	季节	25%分位数	75%分位数	平均值	中位数
PW/mm	4—6 月	14	28	21	22
	7—9 月	24	40	33	31
干侧露点温度/°C	4—6 月	−1	9	4	5
	7—9 月	11	15	13	12
湿侧露点温度/°C	4—6 月	14	20	16	16
	7—9 月	22	24	23	23
0~6 km 垂直风切变/(m·s ^{−1})	4—6 月	13	26	20	17
	7—9 月	9	17	15	13

含量明显好于干侧。因此,触发对流干线的干湿两侧对水汽条件的要求更高。两种类型的干侧、湿侧露点温度 25%~75%分位数分别在 1~12℃、-2~8℃和 16~22℃、13~20℃。如果针对能触发对流的干线选择露点温度阈值,则相应 25%分位数 1℃、16℃是其预警指标。如果将 PW 和露点温度结合起来,可以对无对流干线和触发对流干线进行一定程度的区分。研究山东经常出现的干线区域发现,在干线的湿空气一侧沿着干线有雷暴发展,这与王秀明等(2012)研究一致。根据表 1 中不同季节的分析结果,触发对流干线 4—6 月、7—9 月的干侧和湿侧露点温度分别对应的 25%分位数(-1℃、11℃和 14℃、22℃)可作为其预警指标。

3.2 不稳定条件

综合预报经验及业务实践,筛选出对强对流天气有重要指示意义的能量类和层结稳定度类等对流参数。

3.2.1 能量类参数

对流有效位能(CAPE)和对流抑制(CIN)均是深厚湿对流发生潜势与潜在强度的重要指标。2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的 CAPE 值差别较大(图 6c),均值分别为 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $148 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,中位数分别为 $380 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $70 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,25%~75%分位数分别在 $120 \sim 850 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $30 \sim 180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对应的极大值为 $1533 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,最小只有 $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (由于探空站时空分辨率较低,这与根据订正探空资料计算的 CAPE 不能很好反映对流云发生时的不稳定能量有关)。相比于无对流干线,触发对流干线的 CAPE 值分布较分散,数值明显偏大,因此其对 CAPE 的要求是相对高的。综上,就 CAPE 值分布而言,两类干线具有一定可区分性,这与地面露点温度和 PW 的情况类似。针对能触发对流的干线选择 CAPE 阈值,则触发对流干线对应 25%分位数($120 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)可作为其阈值。

CIN 决定深厚湿对流所需的抬升强度。2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的 CIN 均值分别为 $115 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $35 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (无对流干线的 CIN 值太小,故图略),中位数分别为 $120 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,25%~75%分位数分别在 $0 \sim 150 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0 \sim 5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略)。相对于无对流干线,触发对流干线的 CIN 值明显偏大。因此就 CIN 值分布而言,触发对流干线与无对流干线具有一定可区分性。

下沉气流有效位能(DCAPE)可定量描述雷暴内产生强烈下沉气流(下击暴流-雷暴大风)的潜势大小。2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的 DCAPE 均值分别为 $550 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $450 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 6c),中位数分别为 $700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $340 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,25%~75%分位数分别在 $150 \sim 850 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $90 \sim 800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图可见两类干线的 DCAPE 值分布均较分散,但触发对流干线的数值明显偏大,其对 DCAPE 的要求明显更高,因此就 DCAPE 值分布而言,两类干线具有一定可区分性,这与 CAPE、露点温度和 PW 的情况类似。触发对流干线对应 25%分位数($150 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)可作为其 DCAPE 预警指标。

3.2.2 850 hPa 和 500 hPa 温差

大气静力稳定度是深厚湿对流基本要素之一,其可用 850 hPa 和 500 hPa 之间的温差(ΔT)来表示。2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的 ΔT 均值分别为 29℃、27℃(图 6d),中位数分别为 28℃、26℃。两者之间差异较小,都明显高于湿中性层结下的 20~22℃,表现为明显的条件不稳定层结。两种类型的 ΔT 最小到最大值范围分别是 17~38℃、15~37℃;25%~75%分位数分别在 25~31℃、24~29℃,都具有明显的条件不稳定。综上,对于触发对流干线和无对流干线中的大多数个例(75%以上),850~500 hPa 都具有明显的条件不稳定层结,但无触发机制,因此有些个例未出现强对流天气。如果要选择 ΔT 的干线触发对流阈值,则选择 25%分位数(25℃)作为阈值较为合适,因为表中对应两类干线的 ΔT 范围差别不大。

3.2.3 强天气威胁指数

强天气威胁指数(SWEAT)主要通过结合大气的热力不稳定条件和垂直风切变等动力条件来诊断分析和预报强对流天气,是一个无量纲量(孙继松等,2014)。2001—2022 年山东触发对流干线和无对流干线的 SWEAT 均值分别为 180、120(图 6e),中位数分别为 145、90,即触发对流干线的 SWEAT 值分布更分散,数值更大,说明两者之间在强对流发生潜势之间存在明显差异。两类干线 SWEAT 分布的 25%~75%分位数分别在 110~210、60~130,差异显著。综上,相比无对流干线,触发对流干线 SWEAT 的均值和中位数明显偏高,这可以作为区分有无对流干线的判定指标之一。如果要选择触发对流干线的 SWEAT 阈值,则其对应的 25%分位数(110)可作为其阈值。

分不同季节对上述不稳定条件进行了分析,发现 4—6 月、7—9 月的 CAPE、CIN、DCAPE、 ΔT 、SWEAT 等对流参数的 25% 分位数与 4—9 月阈值均差别较小,因此不再赘述。

3.3 垂直风切变

垂直风切变是强对流天气预报的重要关键参数,其对风暴组织、结构和演变的影响最大,较常用的是低层(0~1 km 和 0~3 km)垂直风切变和深层(0~6 km)垂直风切变(Markowski and Richardson, 2010)。分析发现山东触发对流干线和无对流干线的低层垂直风切变均差别不大(图略),其中两类干线的 0~1 km 垂直风切变均值均为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中位数分别为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 25%~75% 分位数分别在 $4 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $5 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 0~3 km 垂直风切变均值均为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中位数均为 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 25%~75% 分位数均为 $6 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。因此触发对流干线对应 25% 分位数的 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 可分别作为 0~1 km 和 0~3 km 垂直风切变的阈值。综上,低层垂直风切变无法有效区分有无对流干线。但两类干线的深层垂直风切变差别较大(图 6f), 0~6 km 垂直风切变的中位数分别为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均值分别为 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,都属于中等强度的深层垂直风切变

(Johns and Doswell III, 1992; 俞小鼎等, 2012),即在弱的垂直风切变情况下,无干线触发出强对流天气。图中显示,少量触发对流干线个例的深层垂直风切变很大,可达 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,此类强对流天气一般发生在初夏,大气斜压性很强。两类干线的 25%~75% 分位数分别在 $12 \sim 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10 \sim 21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此触发对流干线的 0~6 km 垂直风切变对应 25% 分位数($12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)可作为其阈值。

根据表 1 中不同季节的分析结果,0~1 km 和 0~3 km 垂直风切变的季节阈值均差别很小;触发对流干线 4—6 月和 7—9 月的 0~6 km 垂直风切变分别对应 25% 分位数($13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)可分别作为预警阈值。

4 干线触发对流天气的有利流型配置

除了与大气层结不稳定、垂直风切变、水汽等条件有关外,干线形成与触发对流还与天气背景和影响系统关系密切。统计分析山东触发对流的 156 d 干线个例的高空形势(图 7),发现高空 500 hPa 的影响系统主要分为高空槽、西北气流、前倾槽、冷涡、切变线、横槽、台风倒槽等七类。干线一般多发生在高空槽前或西北气流的环流形势下,其中 42.3% 为高空槽影响,27.6% 出现在高空西北气流

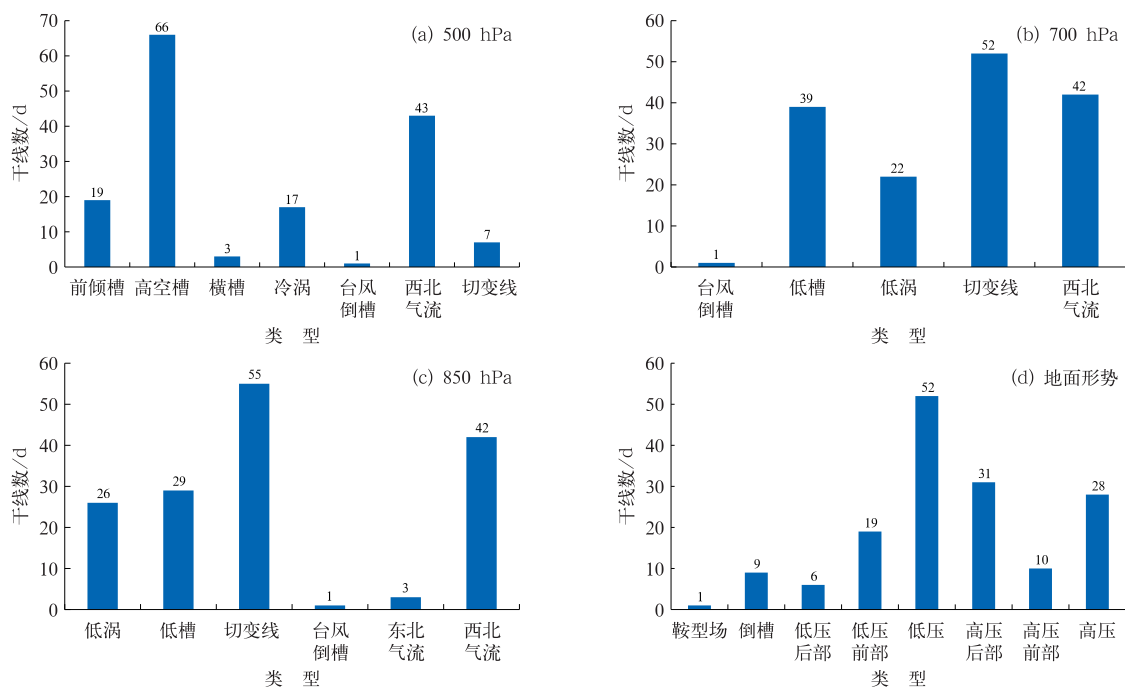


图 7 2001—2022 年山东触发对流干线的不同层次天气形势

Fig. 7 The synoptic situations of drylines triggering convections in Shandong Province during 2001–2022

的控制下,此形势下中高纬度的高度场一般东低西高,华北或东北地区附近常为低涡;12.2%为前倾槽影响,10.9%为东北冷涡或华北冷涡影响形势下,在切变线、横槽、台风倒槽的环流形势下干线出现对流天气的日数很少,均低于 10 d。700 hPa 发生在切变线的环流形势下干线频次最多,占总数的 33.3%;其次为西北气流,占总数的 26.9%;低槽占 25%,低涡占 14.1%,台风倒槽最少。850 hPa 与 700 hPa 一致,也是发生在切变线形势下的干线最多,占总数的 35.3%;其次为西北气流,占总数的 26.9%,低槽和低涡分别占 18.6%和 16.7%,东北气流和台风倒槽最少,均低于 5 d。

综上,山东触发对流的干线个例中,高空 500 hPa 大部受高空槽、西北气流或东北冷涡(低涡)影响,低空主要受低涡切变线、西北气流控制,受海陆下垫面性质差异和槽后下沉增温的影响,此形势下暖季我国大陆地面常出现低压带或暖低压。对流层低层的偏西气流带来的暖干空气,经过山脉(太行山或泰山)下沉增温和辐射增温的共同作用,使得鲁西北、鲁中地面上常出现干而暖的空气,与受夏季风影响来自东海和黄河的暖湿气流相遇形成露点温度梯度大值带。

不同的地面形势对干线强度(露点温度水平梯度)影响较大,其强度越大,力管项就越强,力管项强迫的垂直环流就越强,触发深厚湿对流的可能性就越大(Schultz et al, 2007)。山东干线的地面形势(图 7)显示,干线大部发生在西低东高的气压场(沿海高压后部和大陆暖低压带)中,东部均为沿海高压。这与我国显著的季风气候有直接关系。156 d 山东触发对流干线个例中有 33.3%发生在大陆暖低压带内,19.9%发生在沿海高压后部,17.9%发生在高压控制下,12.2%出现在大陆暖低压前部,高压前部、倒槽、低压后部和鞍型场出现日数很少,均不超过 10 d。地面大陆暖低压盛行偏西暖干气流,沿海高压后部多盛行不断向北输送的偏南暖湿气流,此气流在山东主要来源于我国东部海面。沿海高压后部的偏南暖湿空气与暖低压前部或底部的干暖空气在山东形成汇合流场,特别是华北低涡或东北低涡或高空槽控制时,山东多位于其低涡底部或槽前,偏南与偏西风的汇合流场明显,从而在山东形成干线并触发对流。综上,山东干线多发生在高空 500 hPa 为西北气流、西风槽前和东北低涡形势下,低空 700 hPa、850 hPa 主要受低涡切变线或西北气

流影响,边界层多伴有辐合线,地面图上主要位于低压底部或前部的辐合流场或大陆暖低压中。

另外,统计分析了 2001—2022 年伴随地面辐合线或汇合流场的山东干线数为 287 d,占干线总数的 63.6%;伴随地面辐合线或汇合流场的触发对流干线总数为 122 d,占触发对流干线总数的 78.2%。综上,与干线相伴随的地面辐合线对山东强对流的出现主要起了合并加强的触发作用,伴随中尺度上升气流,致使深厚湿对流(雷暴)的出现。

5 结论与讨论

基于常规地面高空观测、ERA5 再分析、卫星和雷达等资料,对 2001—2022 年山东干线的时空分布、结构、关键环境参数及有利流型配置进行了分析,得到以下结论:

(1)2001—2022 年山东干线总日数为 451 d,年平均干线日数为 20.5 d,发生频率为 9.8%。触发对流干线总日数为 156 d,年平均为 7.1 d,发生频率为 3.4%。5 月和 5 月上旬是山东干线和触发对流干线出现最多的月份和旬。触发对流干线集中出现在 14—17 时,夜间最少。干线主要分布在鲁中、鲁西北地区,胶东半岛和鲁东南最少,这主要受地形和海陆分布影响。干线走向多呈准南北向或东北—西南走向。

(2)山东触发对流干线和无对流干线的宽度分别为 75~106 km 和 80~114 km,露点温度梯度分别为 $11.8\sim 16.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 和 $9.8\sim 15.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。相比无对流干线,触发对流干线的宽度更小、干湿两侧的露点温度更高、露点温度梯度值更大。宽度越小,露点温度水平梯度越大,力管项越强,导致力管项强迫的垂直环流越强,该环流是干线垂直环流的一部分,因此抬升越强,触发对流可能性越大。两类干线的干湿两侧温度、气压及气压梯度均差别不大。相比而言,触发对流干线的两侧气压值略小,温度梯度值略大,温度更高。

(3)通过对比分析,找出山东触发对流干线的关键环境参数阈值。对露点温度、PW、CAPE、CIN、850 hPa 和 500 hPa 温差、DCAPE、SWEAT 及 0~6 km 垂直风切变等分布而言,触发对流干线与无对流干线具有一定可区分性,但 0~1 km 和 0~3 km 的垂直风切变因差距较小难以区分。不稳定条件的物理量季节差别不大,但 0~6 km 垂直风切变与水

汽条件的物理量季节差异较大,因此应分季节区分其阈值。

(4)山东干线多发生在高空 500 hPa 为西北气流或西风槽前或东北低涡的形势下,低空 700 hPa、850 hPa 主要受低涡切变线或西北气流影响,边界层多伴有辐合线。地面形势显示山东干线主要位于低压前部或底部的辐合流场或大陆暖低压中,气压场东高西低,东部均为沿海高压。

本文对山东干线特征做了较细致的研究,但仍有一些问题需进一步研究。比如干线和冷锋在有无触发对流方面的异同点,尚需下一步将对这些问题加强研究,以便构建山东干线的预报概念模型,提高强对流预报预警和判别能力,为强对流天气预报提供技术支撑。

参考文献

- 曹艳察,郑永光,周晓敏,等,2026. 2024 年 7 月 5 日山东菏泽龙卷灾害现场调查与中尺度特征[J]. 气象,52(2):174-189. Cao Y C, Zheng Y G, Zhou X M, et al, 2026. Damage survey and mesoscale characteristics of the tornadoes in Heze of Shandong Province on 5 July 2024[J]. Meteor Mon, 52(2):174-189(in Chinese).
- 戴建华,陶岚,丁杨,等,2012. 一次罕见飑前强降水超级单体风暴特征分析[J]. 气象学报,70(4):609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al, 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 70(4):609-627(in Chinese).
- 方祖亮,俞小鼎,王秀明,2020. 东北暖季干线统计分析[J]. 气象学报,78(2):260-276. Fang Z L, Yu X D, Wang X M, 2020. Statistical analysis of drylines in Northeast China[J]. Acta Meteor Sin, 78(2):260-276(in Chinese).
- 高帆,俞小鼎,王秀明,2023. 山东较大范围致灾雷暴大风的多普勒天气雷达特征[J]. 气象,49(7):790-804. Gao F, Yu X D, Wang X M, 2023. Doppler radar characteristics of wide-range damaging thunderstorm gales in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 49(7):790-804(in Chinese).
- 高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018a. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报,76(2):196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018a. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):196-212(in Chinese).
- 高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018b. 山东半岛两次海风锋引起的强对流天气对比[J]. 应用气象学报,29(2):245-256. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018b. Comparative analysis of two strong convections triggered by sea-breeze front in Shandong Peninsula[J]. J Appl Meteor Sci, 29(2):245-256(in Chinese).
- 何娜,田野,陈明轩,等,2025. 多源高频次探测资料在北京强对流个例临近预报中的应用[J]. 气象,51(10):1157-1170. He N, Tian Y, Chen M X, et al, 2025. Application of multi-source high-frequency detection data to the nowcasting of local severe convection in Beijing[J]. Meteor Mon, 51(10):1157-1170(in Chinese).
- 侯淑梅,朱晓清,史茜,等,2023. 冷涡背景下山东省“5·17”极端强对流天气环境条件分析[J]. 气象,49(11):1328-1342. Hou S M, Zhu X Q, Shi Q, et al, 2023. Analysis of the environmental conditions of “5·17” extremely severe convective weather in Shandong Province under the background of cold vortex[J]. Meteor Mon, 49(11):1328-1342(in Chinese).
- 雷雨顺,吴宝骏,吴正华,1978. 用不稳定能量理论分析和预报夏季强风暴的一种方法[J]. 大气科学,2(4):297-306. Lei Y S, Wu B J, Wu Z H, 1978. A method for analysing and forecasting the local severe storms in summer using the theory of instability energy[J]. Chin J Atmos Sci, 2(4):297-306(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. The Basic Principles and Methods of Convective Weather Forecasting: China Convective Weather Forecasting Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 孙继松,陶祖钰,2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象,38(2):164-173. Sun J S, Tao Z Y, 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon, 38(2):164-173(in Chinese).
- 孙淑清,孟婵,1992. 中- β 尺度干线的形成与局地强对流暴雨[J]. 气象学报,50(2):181-189. Sun S Q, Meng C, 1992. The formation of a meso- β dry line and local convective rainstorm[J]. Acta Meteor Sin, 50(2):181-189(in Chinese).
- 陶岚,戴建华,李佰平,等,2016. 上海地区移动型雷暴阵风锋特征统计分析[J]. 气象,42(10):1197-1212. Tao L, Dai J H, Li B P, et al, 2016. Characteristics' statistical analysis of gust front generated by moving thunderstorms in Shanghai[J]. Meteor Mon, 42(10):1197-1212(in Chinese).
- 王金兰,俞小鼎,汤兴芝,等,2021. 黄淮地区触发对流天气的干线特征[J]. 应用气象学报,32(5):592-602. Wang J L, Yu X D, Tang X Z, et al, 2021. Characteristics of convection-triggering drylines in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers[J]. J Appl Meteor Sci, 32(5):592-602(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,等,2012. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象,31(2):504-514. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al, 2012. Study on the formation and evolution of “6.3” damage wind[J]. Plateau Meteor, 31(2):504-514(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象,40(4):389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon, 40(4):389-399(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2015. 中国东北龙卷研究:环境特征分析[J]. 气象学报,73(3):425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of northeast China torandoes: the environmental

- characteristics[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(3): 425-441 (in Chinese).
- 俞小鼎, 费海燕, 王秀明, 2024. 2024年2月17—23日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题[J]. *气象*, 50(9): 1033-1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M, 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024[J]. *Meteor Mon*, 50(9): 1033-1042 (in Chinese).
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. *Thunderstorms and Severe Convection Nowcasting*[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 俞小鼎, 郑永光, 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. *气象学报*, 78(3): 391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3): 391-418 (in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. *气象学报*, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3): 311-337 (in Chinese).
- 张桂莲, 赵艳丽, 黄晓璐, 等, 2019. “9.24”内蒙古东南部致灾飑线过程成因分析[J]. *暴雨灾害*, 38(1): 41-47. Zhang G L, Zhao Y L, Huang X L, et al, 2019. Causality analysis of a disaster-causing squall line event on 24 September in southeastern Inner Mongolia[J]. *Torr Rain Dis*, 38(1): 41-47 (in Chinese).
- 张小玲, 郑永光, 杨波, 2019. 强对流天气研究和预报技术[M]. 北京: 气象出版社: 522. Zhang X L, Zheng Y G, Yang B, 2019. *Severe Convection Weather Research and Forecasting Technology*[M]. Beijing: China Meteorological Press: 522 (in Chinese).
- 张一平, 俞小鼎, 王迪, 等, 2021. 河套及周边地区干线触发对流天气特征初步分析[J]. *高原气象*, 40(5): 1024-1037. Zhang Y P, Yu X D, Wang D, et al, 2021. A preliminary analysis of the characteristics of drylines and its triggering convections in the Hetao and surrounding regions[J]. *Plateau Meteor*, 40(5): 1024-1037 (in Chinese).
- 张一平, 俞小鼎, 王迪, 等, 2022. 河套地区典型干线的形成及其在对流触发中的作用[J]. *气象学报*, 80(1): 39-53. Zhang Y P, Yu X D, Wang D, et al, 2022. The formation of typical dry lines in Hetao and its role in triggering convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(1): 39-53 (in Chinese).
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. *气象*, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. *Meteor Mon*, 43(6): 641-652 (in Chinese).
- 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等, 2010. 强对流天气短临预报业务技术进展与挑战[J]. *气象*, 36(7): 33-42. Zheng Y G, Zhang X L, Zhou Q L, et al, 2010. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting[J]. *Meteor Mon*, 36(7): 33-42 (in Chinese).
- 郑永光, 杨波, 蓝渝, 等, 2025. 强对流天气形成机制和预报研究综述[J]. *气象*, 51(11): 1495-1522. Zheng Y G, Yang B, Lan Y, et al, 2025. A review of mechanisms and forecasting technology of severe convective weather[J]. *Meteor Mon*, 51(11): 1495-1522 (in Chinese).
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang Y P, et al, 2019. Convection initiation resulting from the interaction between a quasi-stationary dryline and intersecting gust fronts: a case study[J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(5): 2379-2396.
- Holton J R, 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*[M]. New York: Academic Press: 88-91.
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting[J]. *Wea Forecasting*, 7(4): 588-612.
- Markowski P, Richardson Y, 2010. *Mesoscale Meteorology in Mid-latitudes*[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd: 407.
- Qin R, Chen M X, 2017. Impact of a front-dryline merger on convection initiation near a mountain ridge in Beijing[J]. *Mon Wea Rev*, 145(7): 2611-2633.
- Schultz D M, Weiss C C, Hoffman P M, 2007. The synoptic regulation of dryline intensity[J]. *Mon Wea Rev*, 135(5): 1699-1709.

(本文责编: 戴洋)