

王金兰,俞小鼎,汤兴芝,等. 黄淮地区触发对流天气的干线特征. 应用气象学报,2021,32(5):592-602.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20210507

# 黄淮地区触发对流天气的干线特征

王金兰<sup>1)2)</sup> 俞小鼎<sup>3)\*</sup> 汤兴芝<sup>4)</sup> 于海敬<sup>1)2)</sup> 胡亮帆<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003)

<sup>2)</sup>(河南省新乡市气象局,新乡 453003)

<sup>3)</sup>(中国气象局干部培训学院,北京 100081)

<sup>4)</sup>(中国气象局干部培训学院湖北分院,武汉 430074)

## 摘 要

利用高空和地面观测、欧洲中期预报中心再分析资料(ERA5)以及卫星云图,统计 2010—2019 年 4—9 月我国黄淮地区触发对流天气的干线特征。结果表明:干线主要出现在山东德州附近和豫北周边地区,多呈准西北—东南向和准东北—西南向;长度集中在 100~200 km,宽度在 50~100 km;多出现在 14:00(北京时,下同)或 17:00;多发生在高空冷涡形势下,低层多有切变线(或辐合线)配合,地面多位于入海高压后部。地面气象要素统计显示:干线干侧温度较湿侧偏高 1.9℃,湿侧露点温度较干侧偏高 6.8℃,干线两侧温度梯度为 $-2.7^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ,露点温度梯度为 $10.1^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ,比湿梯度为 $5.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。探空参数统计结果表明:干线湿侧大气可降水量略高于干侧,925 hPa,850 hPa 和 700 hPa 湿侧比湿均大于干侧;对流有效位能湿侧平均值远大于干侧;干线两侧 700 hPa,850 hPa 与 500 hPa 温度差非常接近,即黄淮地区干线两侧对流有效位能的显著差异主要由干线两侧低层水汽条件差异造成,干线两侧条件不稳定性大致相当。

**关键词:** 黄淮地区; 对流触发; 干线; 统计分析

## 引 言

强对流天气突发性强、历时短、局地性强,是导致气象灾害的重要天气类型,主要包括冰雹、雷暴大风、短时强降水和龙卷<sup>[1-2]</sup>。该类天气是多尺度天气系统相互作用的结果,其演变方式难于把握,预报上有很大不确定性。因此,强对流天气研究对于防灾减灾意义重大。多年来,中外气象学者在强对流天气研究和业务应用方面做了大量工作<sup>[1-7]</sup>。同时,朱士超等<sup>[8]</sup>对江淮地区孤立对流云特征进行统计,得到孤立对流云的发生规律。马瑞阳等<sup>[9]</sup>通过构建雷暴云特征数据集,分析我国陆地和毗邻海域的雷暴活动特征。俞小鼎等<sup>[10]</sup>总结了冰雹、龙卷、雷暴大风和短时强降水 4 类强对流天气发生的有利条件和

多普勒天气雷达回波特征。

边界层辐合线是强对流触发机制之一,主要包括冷锋和干线伴随的辐合(切变)线、雷暴出流边界(阵风锋)、海风锋辐合线、地形辐合线以及水平对流卷(云街)等<sup>[2,11-12]</sup>,相关研究<sup>[13-18]</sup>表明:边界层辐合线在雷暴生成、发展和减弱过程中发挥重要作用。

干线伴随的辐合线是触发强对流天气的机制之一,干线又称为干锋(dry fronts)或露点锋(dew point fronts),该概念起源于美国<sup>[19-21]</sup>,指出现在美国南部大平原中西部地区的干暖空气和暖湿空气之间的边界,这里的干暖空气来自西南部的墨西哥高原地区,暖湿空气来自东南部的墨西哥湾。干线的主要特征是其两侧露点温度或比湿差异明显,而温度差异较小,干侧温度通常午后略高于湿侧,夜间则略低于湿侧。

2021-05-14 收到,2021-08-03 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41775044),河南省气象科学技术研究项目(KZ201702)

\* 通信作者,邮箱:xdyu1962@126.com

近年,随着我国强对流天气分析业务的开展,干线也逐渐引起关注。王秀明等<sup>[22]</sup>认为2009年豫东强飚线的发展和维持是飚线自组织机制建立的结果,干线及叠加在干线上的风场辐合扰动触发的新生回波带不断并入飚线北端使其持续强烈发展。郑媛媛等<sup>[23]</sup>指出东北冷涡背景下,江淮飚线生成时,850 hPa、925 hPa和地面有辐合线或干线存在。王晓玲等<sup>[24]</sup>研究发现,干线两侧干湿平流加强产生的局部露点锋生促进了上升运动发展。王秀明等<sup>[6]</sup>发现东北地区龙卷由汇合流场导致的地面辐合线触发造成,这种汇合流场多伴随地面干线。周雪英等<sup>[25]</sup>分析新疆库尔勒地区产生强降水的触发抬升机制,将其分为干线触发类、冷锋触发类和混合触发类3种。Qin等<sup>[26]</sup>分析发生在北京西北部的对流个例,发现其由干线和冷锋合并后触发。Bai等<sup>[27]</sup>指出2009年6月3日傍晚豫北平原地区一次强对流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。方祖亮等<sup>[28]</sup>统计了东北地区2003—2017年5—8月干线的气象要素和时空分布特征,并对触发对流天气的干线和未触发对流天气的干线环境参数进行对比。

在我国,干线经常出现在东北地区。黄淮地区地势西高东低,西部为山区,东部为平原,具有与干线多发的美国西南部和我国东北地区一定程度上相似的地形和地势条件,雷暴、冰雹、强降水、龙卷等对流性天气时有发生<sup>[29]</sup>。因此,有必要系统研究黄淮地区干线的时空分布特征及触发对流条件。

## 1 资料、方法与个例选取标准

### 1.1 资料

本文所用资料为2010—2019年暖季(4—9月)常规高空和地面观测、欧洲中期天气预报中心(EC-MWF)再分析资料ERA5(空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为1 h)及FY-2E气象卫星云图。研究范围为 $30^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ , $110^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ 的平原地区,主要包括黄淮地区及华北南部(简称黄淮地区)。

### 1.2 方法

本文采用主客观结合的方法识别干线,普查2010—2019年4—9月每日8次地面图所有常规地面观测资料,利用MICAPS4.6系统中的要素分析

功能,选取变分法对露点温度进行间隔为 $1^\circ \text{C}$ 的等值线客观分析,挑选出符合标准的干线,挑选时需在地面天气图上叠加高分辨率地形图,以避免将一些受到地形影响的虚假干线误判为干线。通过分析个例的高空、地面图及卫星云图,统计黄淮地区触发对流天气的干线时空分布特征、干线两侧地面要素和探空资料及参数特征,给出定量统计结果。

统计过程中,采用MICAPS4.6系统中球面距离工具获取干线的长度和宽度。地面比湿由MICAPS4.6系统中的比湿计算功能获取。由于探空站分布稀疏,无法精确获取干线两侧的探空参数,因此选取干线两侧附近的探空站,利用探空资料分析显示系统(SANDS),采用干线两侧14:00(北京时,下同)地面平均温度和平均露点温度对08:00的 $T-\ln p$ 图进行订正,订正后的探空参数用于近似代表干线两侧大气的环境参数。同时,利用ERA5再分析资料中位于干线附近网格点的平均值,验证干线两侧比湿、对流有效位能和温度递减率等特征。

### 1.3 干线标准

从国内外研究看,在不同时期、不同研究区域对干线的定义也不相同<sup>[20,28,30-32]</sup>。方祖亮等<sup>[28]</sup>在研究我国东北地区干线时,界定的干线标准为露点温度水平梯度不小于 $6^\circ \text{C} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$ ,且午后温度最高时,干空气一侧温度略高于或大致等于湿空气一侧温度。考虑到国内预报员常用露点温度表示地面湿度条件,且黄淮地区的地形和地势条件与我国东北地区有一定相似度,本文参照文献<sup>[28]</sup>,将干线标准规定为地面图上100 km范围内露点温度差高于 $6^\circ \text{C}$ ,温度差远小于露点温度差,同时14:00干空气一侧温度等于或略高于湿空气一侧温度。

### 1.4 触发对流天气的干线选取标准

按照上述地面干线标准,结合黄淮地区的天气实况、卫星云图、重要天气报,普查每日8次地面资料,干线个例需满足以下条件:地面图上,现在、过去天气现象有雷阵雨或阵雨(2014年后取消雷暴观测,不再有雷阵雨记录,但需有阵雨);在干线露点温度密集带或其两侧50 km范围内有对流云团出现。根据上述条件共挑选出16个典型个例,表1为这16个典型干线个例发生的时间、地点和伴随的天气现象。

表 1 2010—2019 年黄淮地区触发对流天气的干线信息

| 序号 | 发生时间                   | 发生地点   | 伴随天气      | 环流背景        |
|----|------------------------|--------|-----------|-------------|
| 1  | 2010-06-03T14:00.17:00 | 德州—淄博  | 雷阵雨       | 华北冷涡后部      |
| 2  | 2010-06-17T14:00       | 濮阳南乐   | 雷阵雨       | 华北冷涡底部      |
| 3  | 2010-07-07T14:00       | 原阳     | 雷阵雨       | 副热带高压外围偏西气流 |
| 4  | 2011-06-08T14:00.17:00 | 商丘永城   | 雷阵雨       | 槽后西北气流      |
| 5  | 2011-06-11T14:00.17:00 | 濮阳—商丘  | 雷阵雨、大风、冰雹 | 华北冷涡底部      |
| 6  | 2012-05-16T14:00       | 临沂—徐州  | 雷阵雨、大风    | 东北冷涡底部      |
| 7  | 2012-05-25T14:00       | 保定东—泊头 | 雷阵雨、大风    | 东北冷涡后部      |
| 8  | 2012-06-06T14:00.17:00 | 河北吴桥   | 雷阵雨       | 槽前          |
| 9  | 2013-05-23T14:00       | 民权—扶沟  | 雷阵雨       | 槽前          |
| 10 | 2014-06-10T14:00       | 保定—淄博  | 阵雨、大风     | 东北冷涡底部      |
| 11 | 2015-08-22T14:00       | 安阳附近   | 阵雨、大风     | 东北冷涡底部      |
| 12 | 2015-08-28T14:00       | 德州—泰山  | 阵雨、大风、冰雹  | 东北冷涡底部      |
| 13 | 2017-04-20T14:00       | 河北山东交界 | 阵雨        | 东北冷涡后部      |
| 14 | 2017-06-12T14:00       | 吴桥—济南  | 阵雨        | 脊前西北气流      |
| 15 | 2018-06-13T14:00       | 新乡     | 阵雨、大风、冰雹  | 华北冷涡底部      |
| 16 | 2019-05-10T14:00       | 邢台—安阳  | 阵雨、大风     | 偏西气流        |

## 2 干线时空分布特征

### 2.1 时间分布特征

由 2010—2019 年黄淮地区触发对流天气的干线出现时间可知,干线出现次数的年际变化不大,出现最多的年份为 2010 年和 2012 年,各 3 次,2016 年未出现符合条件的干线,2010—2019 年的年平均次数为 1.6 次。触发对流天气的干线多出现在 5—6 月,其中 6 月最多,为 8 次;9 月未出现符合条件的干线。

个例在 14:00 地面图上干线特征最明显,且出现次数最多,共计 14 次,占 87.5%;其余为 17:00,共 2 次,占 12.5%,其他时次未出现符合条件个例。因此,黄淮地区触发对流天气的干线具有明显的日变化特征,出现在 14:00 或 17:00。

### 2.2 空间分布特征

2010—2019 年黄淮地区 16 次触发对流天气的干线个例空间分布特征与地形密切相关(图略),集中在两个区域:一是河北山东交界处的德州附近,共 7 次,占 43.8%,其中 6 次呈准西北—东南向;二是豫北周边地区,共 7 次,占 43.8%,其中 6 次呈准东北—西南向。另外,徐州附近出现 2 次,占 12.5%;淮河沿岸则未出现触发对流天气的干线。

本文用露点温度等值线密集带的宽度(密集带两侧 50 km 内露点温度分布均匀)表示干线宽度,用露点温度等值线密集带的长度(密集带宽度基本

不变时延伸的长度)表示干线的长度。黄淮地区触发对流天气的干线长度为 100~430 km,主要集中在 100~200 km;干线宽度为 50~100 km,16 次触发对流天气的干线个例中有 11 次个例宽度为 60~70 km,占 68.8%。

## 3 干线触发对流天气的环流背景及影响系统

由 16 次触发对流天气的干线个例的高空图(图略)可知,在 500 hPa,黄淮地区干线触发对流天气有 10 次发生在冷涡形势下,占 62.5%,其中东北冷涡形势下 6 次,华北冷涡形势下 4 次;平直西风和西北气流、西南气流形势下各 2 次。相应地,在 700 hPa,7 次为西北气流,7 次为切变线(或辐合线),各占 43.8%;平直的偏西气流和西南气流各 1 次。在 850 hPa,8 次为切变线(或辐合线),占 50%;4 次为偏南气流,4 次为西北气流,各占 25%。因此,黄淮地区触发对流天气的干线个例中,多数在 500 hPa 东北冷涡或华北冷涡形势下产生,低层常有切变线(或辐合线)配合。

地面形势对干线也有影响,黄淮地区干线多发生在入海高压后部的低压带内,这与我国的季风气候有关,16 次触发对流天气的干线个例中,11 次(占 68.8%)发生在入海高压后部的低压带内,2 次处在北高南低的气压场中,2 次处在高压内部,1 次处在南高北低的气压场中。

#### 4 干线两侧地面气象要素和探空参数特征

##### 4.1 干线两侧地面气象要素特征

选取 16 次触发对流天气的干线个例中最强时次,统计其两侧温度、露点温度、比湿、海平面气压、风向、风速等要素的平均值,以及干线两侧温度、露点温度、比湿和海平面气压平均值差值(或梯度)。箱线图能够直观反映各要素主体分布、平均值、最大值、最小值和中位数等特征,采用箱线图表示各种气象要素的特征值。

需要说明的是,由于不同干线个例的干线宽度不同,在计算干线要素梯度时,将梯度单位统一为  $(100 \text{ km})^{-1}$ ,这里的梯度是指湿侧值减去干侧值(每 100 km)。由于午后干侧温度略高于湿侧,所以温度的特征值为负值。

图 1 为 2010—2019 年黄淮地区触发对流天气的干线两侧地面气象要素箱线图。箱线图中,线的最上端表示统计的最大值,最下端表示统计的最小值,箱体上限为 75%分位值,下限为 25%分位值,箱内横线为中位线,圆点表示平均值(下同)。由温度

统计可知,干线湿侧温度最小值为  $22.0^{\circ}\text{C}$ ,即干线触发对流天气的温度在  $22.0^{\circ}\text{C}$  以上;湿侧温度平均值为  $29.9^{\circ}\text{C}$ ,25%~75%分位值集中在  $27.0\sim 32.5^{\circ}\text{C}$ ;干侧温度平均值为  $31.8^{\circ}\text{C}$ ,25%~75%分位值集中在  $30.0\sim 34.3^{\circ}\text{C}$ ;湿侧平均温度较干侧偏低  $1.9^{\circ}\text{C}$ ,干线两侧最高温度为  $37.0\sim 40.0^{\circ}\text{C}$ 。露点温度的显著变化往往反映局地气团性质变化<sup>[33]</sup>,由露点温度统计可知,干线附近的等露点温度线非常密集,干线湿侧露点平均值为  $18.0^{\circ}\text{C}$ ,干侧平均值为  $11.2^{\circ}\text{C}$ ,湿侧露点温度明显高于干侧,两者相差  $6.8^{\circ}\text{C}$ ;湿侧 25%分位值为  $16.5^{\circ}\text{C}$ ,75%分位值为  $21.0^{\circ}\text{C}$ 。这与地面露点温度小于  $15^{\circ}\text{C}$  时,一般不会有强对流的研究一致<sup>[33]</sup>。研究表明:地面比湿与大气可降水量的关系接近线性<sup>[34]</sup>,因为露点温度为比湿的对数函数。由比湿统计可知,地面干线湿侧比湿平均值为  $13.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,干侧平均值为  $9.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,湿侧比湿较干侧偏高  $4.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;湿侧 25%分位值为  $11.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,75%分位值为  $15.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由海平面气压统计可知,湿侧平均值为  $1004.3 \text{ hPa}$ ,干侧平均值为  $1004.1 \text{ hPa}$ ,两侧海平面气压相当。

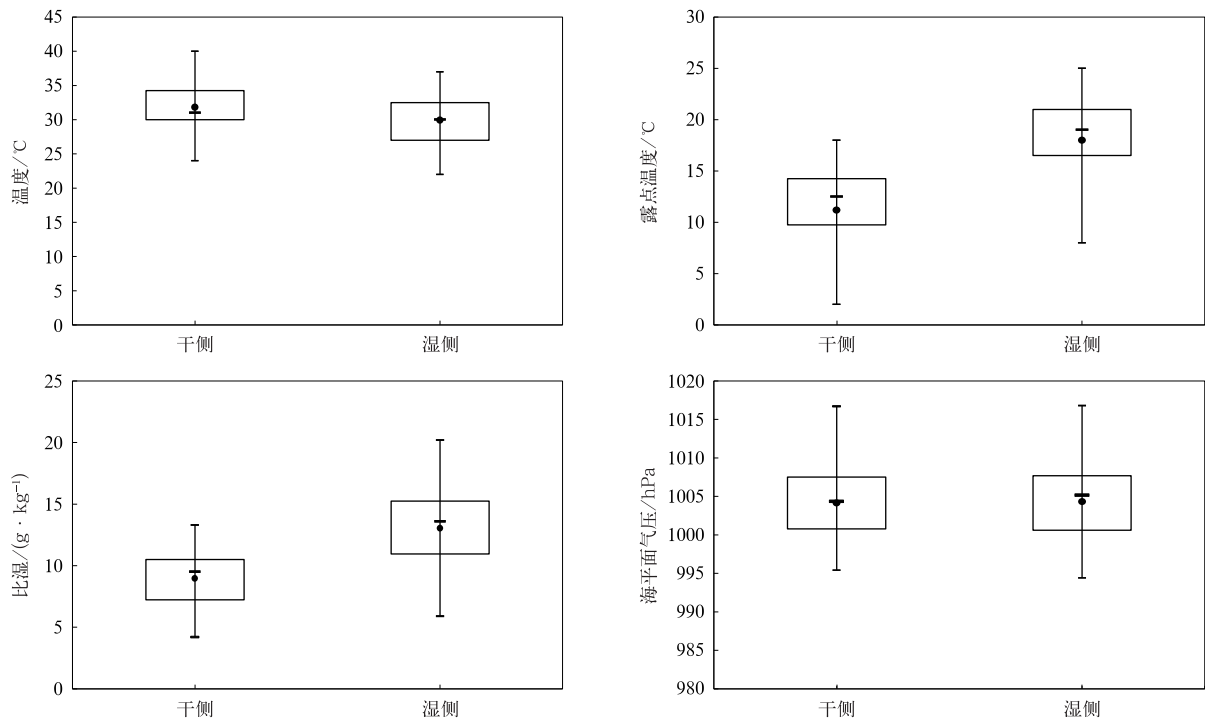


图 1 2010—2019 年黄淮地区触发对流天气的干线两侧地面气象要素箱线图  
 Fig. 1 Surface meteorological elements on both sides of convection-triggering dryline in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers from 2010 to 2019

由图1还可以看到,干线两侧温度、露点温度、海平面气压离散度相当,比湿离散度湿侧较干侧偏大。从温度、露点、比湿和海平面气压4个要素梯度(图略)看,温度梯度平均值为 $-2.7^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ,中位数是 $-2.3^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ;露点梯度的离散度最大,湿侧与干侧露点差值平均相差 $10.1^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ,集中在 $8.4\sim 11.7^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ,最大达 $14.3^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ;比湿梯度的离散度较大,湿侧与干侧比湿差值平均相差 $5.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ,主要集中在 $4.4\sim 6.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ,最大达 $11.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ ;海平面气压梯度的离散度最小。

#### 4.2 干线两侧探空参数特征

雷暴产生的3个基本条件是静力不稳定、水汽和抬升触发机制;大冰雹、对流性强阵风、龙卷等强对流天气产生,还需要较强的垂直风切变;而对于暴雨或短时强降水,有时弱的垂直风切变更有利<sup>[2]</sup>。为进一步认识黄淮地区干线及其触发对流的条件,统计16次触发对流天气的干线个例干湿两侧的探空参数(表2),包括大气可降水量、中低层比湿( $q$ )、对流有效位能、700 hPa与500 hPa温度差、850 hPa与500 hPa温度差和抬升指数以及0~6 km垂直风切变(风矢量差)。

表2 2010—2019年黄淮地区触发对流天气的干线两侧探空参数统计  
Table 2 Soundings on both sides of convection-triggering drylines in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers from 2010 to 2019

| 条件        | 要素                                           | 位置 | 平均值  | 25%百分位 | 75%百分位 | 最大值  |
|-----------|----------------------------------------------|----|------|--------|--------|------|
| 水汽<br>条件  | 可降水量/cm                                      | 湿侧 | 2.5  | 2.0    | 3.2    | 4.0  |
|           |                                              | 干侧 | 2.3  | 1.6    | 2.8    | 3.8  |
|           | 700 hPa 比湿/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 湿侧 | 3.2  | 1.0    | 5.0    | 7.0  |
|           |                                              | 干侧 | 2.4  | 0.8    | 4.0    | 6.0  |
|           | 850 hPa 比湿/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 湿侧 | 5.6  | 3.8    | 8.0    | 11.0 |
|           |                                              | 干侧 | 5.9  | 3.8    | 8.0    | 12.0 |
|           | 925 hPa 比湿/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 湿侧 | 9.4  | 7.3    | 11.0   | 19.0 |
|           |                                              | 干侧 | 7.4  | 4.8    | 11.0   | 21.0 |
| 热力<br>不稳定 | 对流有效位能/( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )     | 湿侧 | 2214 | 1725   | 3184   | 4348 |
|           |                                              | 干侧 | 614  | 236    | 800    | 1910 |
|           | 700 hPa 与 500 hPa 温度差/ $^{\circ}\text{C}$    | 湿侧 | 18.3 | 17.0   | 19.3   | 22.0 |
|           |                                              | 干侧 | 18.2 | 17.0   | 20.0   | 20.0 |
|           | 850 hPa 与 500 hPa 温度差/ $^{\circ}\text{C}$    | 湿侧 | 29.9 | 29.0   | 31.0   | 35.0 |
|           |                                              | 干侧 | 29.6 | 27.8   | 32.0   | 33.0 |
|           | 抬升指数/ $^{\circ}\text{C}$                     | 湿侧 | -6.9 | -7.9   | -6.3   | -1.5 |
|           |                                              | 干侧 | -2.2 | -3.1   | -0.6   | 0.5  |
| 风切变       | 风矢量差/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )        | 湿侧 | 12.5 | 7.5    | 17.5   | 24.5 |
|           |                                              | 干侧 | 11.2 | 6.3    | 15.7   | 24.4 |

##### 4.2.1 水汽条件

实际预报业务中,常用整层大气可降水量衡量大气中的水汽条件。由图2可以看到,黄淮地区触发对流天气的干线湿侧可降水量略高于干侧;湿侧平均值为2.5 cm,25%~75%分位值集中在2.0~3.2 cm;干侧平均值为2.3 cm,25%~75%分位值集中在1.6~2.8 cm。由图3可以看到,在低层,随着高度升高干线两侧比湿平均值均明显减小。925 hPa和700 hPa比湿均为湿侧较干侧偏高;925 hPa湿侧和干侧比湿平均值分别为 $9.4\text{ g}\cdot$

$\text{kg}^{-1}$ 和 $7.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,差值为 $2.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;700 hPa湿侧和干侧比湿平均值分别为 $3.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,差值为 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;但850 hPa湿侧比湿较干侧略小,差值为 $-0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,此结论能否代表黄淮地区干线两侧大气温湿风廓线的比湿特征存在疑问,需采用ERA5再分析资料进一步分析。由表3可以看到,在中低层,干线两侧比湿均随高度升高而明显减小,925 hPa,850 hPa和700 hPa比湿均为湿侧较干侧偏高,因此探空站较稀疏地区应利用ERA5再分析资料进行分析。

4.2.2 热力不稳定条件

对流有效位能是表示大气垂直不稳定度大小的重要参数之一,2010—2019 年黄淮地区 16 次触发对流天气的干线湿侧对流有效位能平均值远大于干侧(图 4),湿侧平均值为  $2214 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,25%~75%分位的对流有效位能为  $1725 \sim 3184 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最大对流有效位能达  $4348 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。干侧对流有效位能平均值仅为  $614 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,25%~75%分位的对流有效位能为  $236 \sim 800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远小于湿侧,这与干线触发对流均发生在干线附近湿侧的绝大多数观测事实吻合。由 700 hPa 与 500 hPa 温度差和 850 hPa 与 500 hPa 温度差(图 4)可知,干线两侧 700 hPa 与 500 hPa 温度差无明显差别,干线两侧 850 hPa 与 500 hPa 温度差也非常接近。利用 ERA5 再分析资料进一步验证干线附近对流有效位能值与温度差特征(表 3),结果表

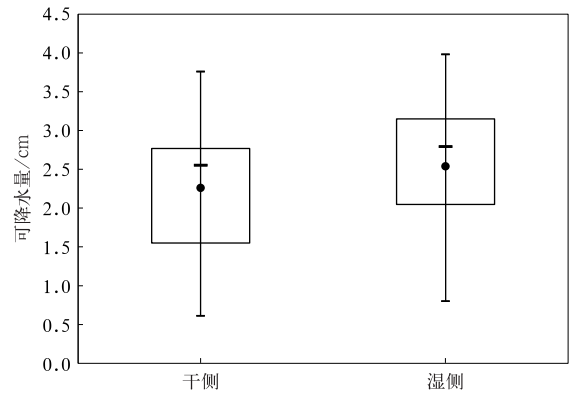


图 2 2010—2019 年黄淮地区触发对流天气的干线两侧大气可降水量箱线图  
Fig. 2 Precipitable water on both sides of convection-triggering dryline in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers from 2010 to 2019

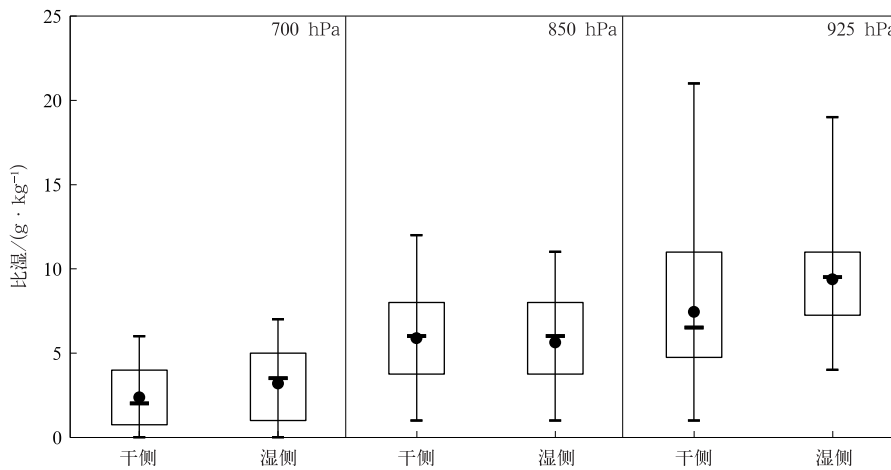


图 3 2010—2019 年黄淮地区触发对流天气的干线两侧中低层比湿箱线图  
Fig. 3 Specific humidity on both sides of convection-triggering drylines in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers from 2010 to 2019

表 3 2010—2019 年黄淮地区触发对流天气的干线两侧 ERA5 再分析资料统计

Table 3 Statistics of specific humidity and convective available potential energy on both sides of convection-triggering drylines in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers using ERA5 reanalysis from 2010 to 2019

| 条件   | 要素                                             | 相对位置 | 平均值  | 25%百分位 | 75%百分位 | 最大值  |
|------|------------------------------------------------|------|------|--------|--------|------|
| 水汽条件 | 700 hPa 比湿/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 湿侧   | 4.5  | 3.6    | 5.6    | 6.5  |
|      |                                                | 干侧   | 4.2  | 3.4    | 5.0    | 6.5  |
|      | 850 hPa 比湿/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 湿侧   | 9.4  | 8.1    | 11.8   | 13.0 |
|      |                                                | 干侧   | 8.1  | 6.8    | 9.6    | 12.5 |
|      | 925 hPa 比湿/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 湿侧   | 10.2 | 9.3    | 12.6   | 14.0 |
|      |                                                | 干侧   | 8.7  | 7.8    | 10.3   | 12.0 |

续表 3

| 条件              | 要素                                 | 相对位置 | 平均值  | 25%百分位 | 75%百分位 | 最大值  |
|-----------------|------------------------------------|------|------|--------|--------|------|
| 热力<br>不稳定<br>条件 | 对流有效位能/( $J \cdot kg^{-1}$ )       | 湿侧   | 1000 | 288    | 1550   | 2500 |
|                 |                                    | 干侧   | 331  | 100    | 325    | 1400 |
|                 | 700 hPa 与 500 hPa 温度差/ $^{\circ}C$ | 湿侧   | 17.8 | 16.6   | 18.9   | 21.6 |
|                 |                                    | 干侧   | 17.8 | 16.8   | 18.8   | 21.5 |
|                 | 850 hPa 与 500 hPa 温度差/ $^{\circ}C$ | 湿侧   | 29.2 | 27.9   | 30.4   | 34.5 |
|                 |                                    | 干侧   | 29.2 | 27.9   | 30.5   | 34.2 |

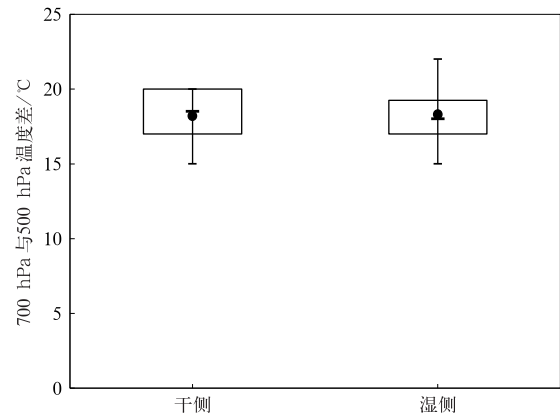
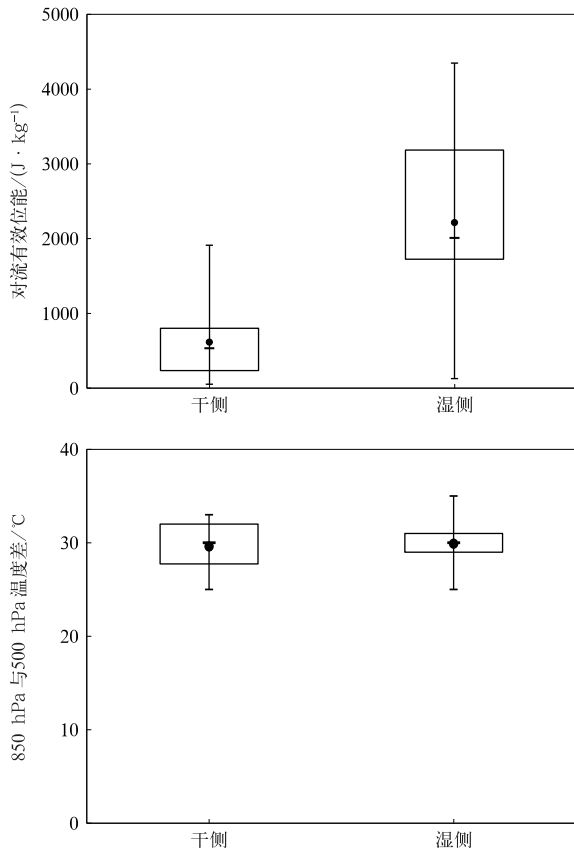


图4 2010—2019年黄淮地区触发对流天气的干线两侧对流有效位能、700 hPa与500 hPa温度差、850 hPa与500 hPa温度差箱线图  
Fig. 4 Convective available potential energy, temperature differences of 700 hPa to 500 hPa and 850 hPa to 500 hPa on both sides of convection-triggering drylines in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers from 2010 to 2019

明:对流有效位能在干线湿侧平均值为  $1000 J \cdot kg^{-1}$ , 远大于干侧平均值  $331 J \cdot kg^{-1}$ , 干线两侧温度差也较为接近, 与上述结论一致。

#### 4.2.3 垂直风切变

统计2010—2019年黄淮地区16次触发对流天气的干线两侧的0~6 km垂直风切变(图5), 湿侧的平均值是  $12.5 m \cdot s^{-1}$ , 为中等强度风切变; 干侧的平均值是  $11.2 m \cdot s^{-1}$ , 为相对弱的垂直风切变, 湿侧的垂直风切变比干侧略强, 说明湿侧更有利于强对流的产生和发展, 这与前面对流有效位能的分析一致。由图5还可以看到, 干线两侧的垂直风切变离散度均很大, 湿侧的25%分位值仅为  $7.5 m \cdot s^{-1}$ , 该条件下发生的对流很难发展为组织程度较高的强对流。

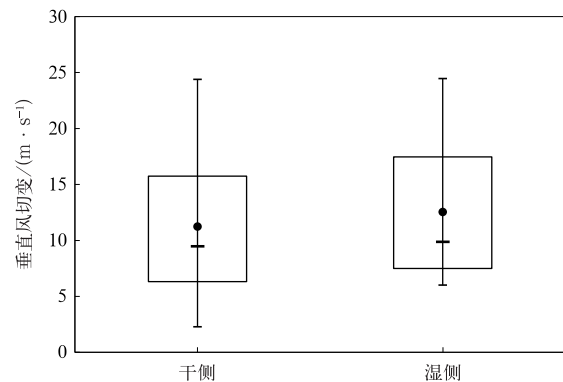


图5 2010—2019年黄淮地区触发对流天气的干线两侧0~6 km垂直风切变箱线图  
Fig. 5 The vertical wind shear of 0~6 km on both sides of convection-triggering drylines in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers from 2010 to 2019

### 5 干线触发对流天气典型个例

2011年6月11日08:00东北冷涡东移过程中在华北北部又切断出一小冷涡，涡后伸出的横槽位于锡林浩特至呼和浩特一线。当日14:00地面图上，山西、河北、河南等地受暖低压控制，暖低压中心为1002.5 hPa，华北南部出现南北向干线(图6)，干线两侧温度相当，干侧露点温度为12~14℃，湿侧露点温度为18~20℃，干线两侧露点温度差不低于6℃。17:00干线维持，对应红外云图上(图略)，在干线中段河南濮阳附近出现小块对流云，随后原地发展加强，范围逐渐扩大，在濮阳周边产生雷暴、大风、局地冰雹等强对流天气。这是一次干线触发的对流天气。11:00—14:00干线两侧存在东南风(干侧)和西南风(湿侧)之间的汇合流场，该汇合流场伴随的辐合上升运动触发对流。2011年6月11日黄

淮地区触发对流天气的干线系统配置见图7。

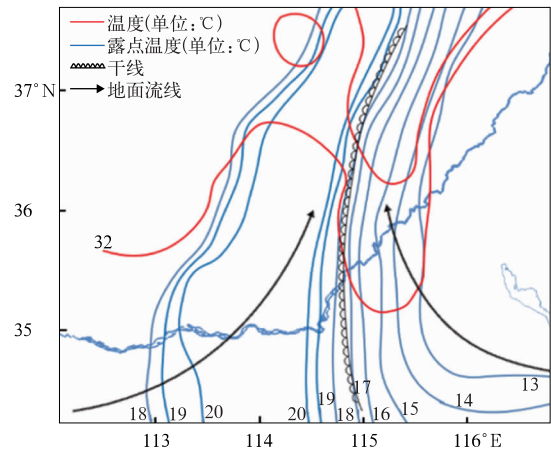


图6 2011年6月11日黄淮地区干线14:00地面图  
Fig. 6 The surface chart of dryline in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers at 1400 BT 11 Jun 2011

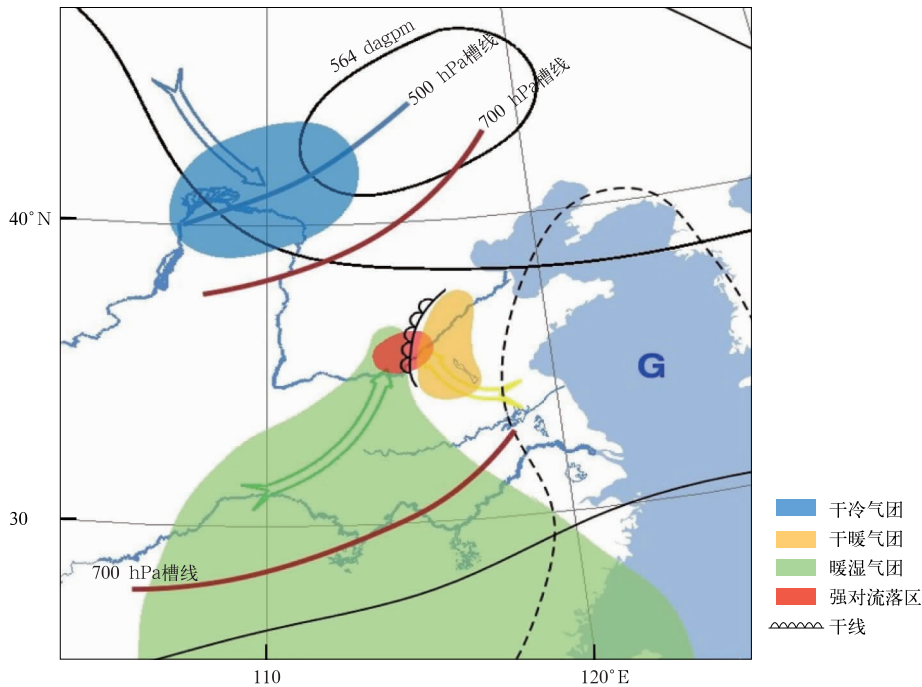


图7 2011年6月11日黄淮地区触发对流天气的干线系统配置图(箭头表示气流方向)  
Fig. 7 The system configuration of convection-triggering dryline in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers on 11 Jun 2011(the arrow denotes the direction)

### 6 结论与讨论

研究表明：

1) 黄淮地区干线主要出现在两处：一是河北山

东交界的德州附近，多呈准西北—东南向；二是豫北周边地区，多呈准东北—西南向。干线长度主要为100~200 km，宽度为50~100 km。干线出现次数年际变化不大，6月最多，有明显的日变化特征，多出现在14:00或17:00。



2) 干线触发对流天气个例多发生在高空冷涡形势下,低层多有切变线(或辐合线)配合,地面多发生在入海高压后部的低压带内。

3) 地面气象要素统计结果表明:干线湿侧温度平均值为 29.9℃,干侧温度平均值为 31.8℃,干侧温度略高于湿侧。干线湿侧露点温度平均值为 18.0℃,较干侧平均值偏高 6.8℃,湿侧露点温度集中在 16.5~21.0℃,最大为 25.0℃。干线湿侧比湿平均值为 13.0 g·kg<sup>-1</sup>,较干侧平均值偏高 4.0 g·kg<sup>-1</sup>。干线两侧海平面气压相当。干线两侧温度梯度为 -2.7℃·(100 km)<sup>-1</sup>,露点梯度为 10.1℃·(100 km)<sup>-1</sup>,比湿梯度为 5.9 g·kg<sup>-1</sup>·(100 km)<sup>-1</sup>。

4) 探空参数统计结果表明:干线湿侧更有利于对流发生。干线湿侧大气可降水量平均值略高于干侧;干线湿侧比湿在 925 hPa,850 hPa 和 700 hPa 均大于干侧;对流有效位能湿侧平均值远大于干侧平均值;干线两侧 700 hPa,850 hPa 与 500 hPa 温度差均没有明显差别。即干线两侧对流有效位能差异主要由两侧低层水汽条件差异造成。干线湿侧的 0~6 km 垂直风切变略强于干侧。

本文仅统计了黄淮地区触发对流天气的干线个例特征,普查过程中发现大量干线未触发对流且多出现在 5—6 月,触发对流天气的干线和未触发对流天气的干线的参数特征及空间结构有何异同,有待后续深入研究。

### 参考文献

- [1] 马淑萍,王秀明,俞小鼎.极端雷暴大风的环境参量特征.应用气象学报,2019,30(3):292-301.  
Ma S P, Wang X M, Yu X D. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(3): 292-301.
- [2] 俞小鼎,王秀明,李万莉,等.雷暴与强对流临近预报.北京:气象出版社,2020.  
Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. Thunderstorm and Strong Convection Nowcasting. Beijing: China Meteorological Press, 2020.
- [3] Fritsch J M, Carbone R E. Improving quantitative precipitation forecasts in warm season: An USWRP research and development strategy. *Bull Amer Meteor Soc*, 2004, 85(7): 955-965.
- [4] 刘泽,郭凤霞,郑栋,等.一次暖云强降水主导的对流单体闪电活动特征.应用气象学报,2020,31(2):185-196.  
Liu Z, Guo F X, Zheng D, et al. Lightning activities in a convection cell dominated by heavy warm cloud precipitation. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 185-196.
- [5] 张小玲,谌芸,张涛.对流天气预报中的环境场条件分析.气象学报,2012,70(4):642-654.  
Zhang X L, Chen Y, Zhang T. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 70(4): 642-654.
- [6] 王秀明,俞小鼎,周小刚.中国东北龙卷研究:环境特征分析.气象学报,2015,73(3):425-441.  
Wang X M, Yu X D, Zhou X G. Study of Northeast China tornado: The environmental characteristics. *Acta Meteor Sinica*, 2015, 73(3): 425-441.
- [7] 俞小鼎,周小刚,王秀明.中国冷季高架对流个例初步分析.气象学报,2016,74(6):902-918.  
Yu X D, Zhou X G, Wang X M. A preliminary case study of elevated convection in China. *Acta Meteor Sinica*, 2016, 74(6): 902-918.
- [8] 朱士超,袁野,吴月,等.江淮地区孤立对流云统计特征.应用气象学报,2019,30(6):690-699.  
Zhu S C, Yuan Y, Wu Y, et al. Statistical characteristics of isolated convection in the Jianghuai Region. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 690-699.
- [9] 马瑞阳,郑栋,姚雯,等.雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征.应用气象学报,2021,32(3):358-369.  
Ma R Y, Zheng D, Yao W, et al. Thunderstorm feature dataset and characteristics of thunderstorm activities in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 358-369.
- [10] 俞小鼎,周小刚,王秀明.雷暴与强对流临近天气预报技术进展.气象学报,2012,70(3):311-337.  
Yu X D, Zhou X G, Wang X M. The advances in the now casting techniques on thunderstorms and severe convection. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 70(3): 311-337.
- [11] 高晓梅,俞小鼎,王令军,等.山东半岛两次海风锋引起的强对流天气对比.应用气象学报,2018,29(2):245-256.  
Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al. Comparative analysis of two strong convections triggered by sea-breeze front in Shandong Peninsula. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(2): 245-256.
- [12] 王福侠,俞小鼎,裴宇杰,等.河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点.应用气象学报,2016,27(3):342-351.  
Wang F X, Yu X D, Pei Y J, et al. Radar echo characteristics of thunderstorm gales and forecast key points in Hebei Province. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(3): 342-351.
- [13] 丁一汇.强对流天气的分析和预报.气象,1978,4(5):15-17.  
Ding Y H. Analysis and forecast of severe convective weather. *Meteor Mon*, 1978, 4(5): 15-17.
- [14] 黄先香,俞小鼎,炎利军,等.广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比.应用气象学报,2018,29(1):70-83.  
Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al. Contrastive analysis of two intense typhoon-tornado cases with synoptic and Doppler weather radar data in Guangdong. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(1): 70-83.
- [15] Khodayar S, Kalthoff N, Wickert J, et al. High-resolution representation of the mechanisms responsible for the initiation of

- isolated thunderstorms over flat and complex terrains: Analysis of CSIP and COPS cases. *Meteor Atmos Phys*, 2013, 119(3/4):109-124.
- [16] 傅佩玲,胡东明,黄浩,等. 台风山竹(1822)龙卷的双极化相控阵雷达特征. *应用气象学报*, 2020, 31(6):706-718.  
Fu P L, Hu D M, Huang H, et al. Observation of a tornado event in outside-region of Typhoon Mangkhut by X-band polarimetric array radar in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6):706-718.
- [17] Emerson T J. Case Studies of Convective Initiations Using Dual-Doppler Analysis During the Convective and Orographically-induced Precipitation Study(COPS)//Proceedings of the 10th Annual Student Conference. Amer Meteor Soc, 2011.
- [18] 罗辉,肖逸祥,匡秋明,等. 四川盆地暖区暴雨的雷达回波特征及分类识别. *应用气象学报*, 2020, 31(4):460-470.  
Luo H, Xiao D X, Kuang Q M, et al. Radar echo characteristics and recognition of warm-sector torrential rain in Sichuan Basin. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4):460-470.
- [19] Fujita T T. Structure and movement of a dry front. *Bull Amer Meteor Soc*, 1958, 39(11):574-582.
- [20] Rhea J O. A study of thunderstorm formation along drylines. *J Appl Meteor Sci*, 1966, 5(1):58-63.
- [21] Schaefer J T. The Dryline Mesoscale Meteorology and Forecasting. Amer Meteor Soc, 1986:549-572.
- [22] 王秀明,俞小鼎,周小刚,等. “6. 3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析. *高原气象*, 2012, 31(2):504-514.  
Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al. Study on the formation and evolution of “6. 3” damage wind. *Plateau Meteor*, 2012, 31(2):504-514.
- [23] 郑媛媛,张雪晨,朱红芳,等. 东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究. *高原气象*, 2014, 33(1):261-269.  
Zheng Y Y, Zhang X C, Zhu H F, et al. Study of squall line genesis with northeast cold vortex. *Plateau Meteor*, 2014, 33(1):261-269.
- [24] 王晓玲,王海燕,王珊珊,等. 边界层准静止干线触发的中尺度暴雨机理分析. *高原气象*, 2015, 34(5):1310-1322.  
Wang X L, Wang H Y, Wang S S, et al. Analysis on mechanism of mesoscale rainstorm triggered by quasistationary dryline in boundary layer. *Plateau Meteor*, 2015, 34(5):1310-1322.
- [25] 周雪英,彭军,刘杰. 库尔勒市强降水天气的环流配置及触发机制分析. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(5):47-55.  
Zhou X Y, Peng J, Liu J. Analysis of circulation configuration and triggering mechanism of the heavy rainfall weather in Korla city. *Desert and Oasis Meteor*, 2015, 9(5):47-55.
- [26] Qin R, Chen M X. Impact of a front-dryline merger on convection initiation near a mountain ridge in Beijing. *Mon Wea Rev*, 2017, 145(7):2611-2633.
- [27] Bai L Q, Meng Z Y, Huang Y P, et al. Convection initiation resulting from the interaction between a quasi-stationary dryline and intersecting gust fronts: A case study. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124(5):2379-2396.
- [28] 方祖亮,俞小鼎,王秀明. 东北暖季干线统计分析. *气象学报*, 2020, 78(2):260-276.  
Fang Z L, Yu X D, Wang X M. Statistical analysis of drylines in Northeast China. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(2):260-276.
- [29] 张一平,牛淑贞,郑世林. “07. 06”周口龙卷现场调查和可预警性综合分析. *气象*, 2019, 45(8):1135-1148.  
Zhang Y P, Niu S Z, Zheng S L, et al. Investigation and warning practicability analysis of the 6 July 2017 tornado in Zhoukou City. *Meteor Mon*, 2019, 45(8):1135-1148.
- [30] 孙淑清,孟婵. 中- $\beta$ 尺度干线的形成与局地强对流暴雨. *气象学报*, 1992, 50(2):180-189.  
Sun S Q, Meng C. The formation of a meso- $\beta$  day line and local convective rainstorm. *Acta Meteor Sinica*, 1992, 50(2):180-189.
- [31] Hoch J, Markowski P. A climatology of springtime dryline position in the US Great Plains region. *J Climate*, 2005, 18(12):2132-2137.
- [32] 郑永光,张春喜,陈炯. 用NCEP资料分析华北暖季对流性天气的气候背景. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(5):600-608.  
Zheng Y G, Zhang C X, Chen J. Climatic back ground of warm-season convective weather in North China based on the NCEP Analysis. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(5):600-608.
- [33] 陶祖钰,范俊红,李开元,等. 谈谈气象要素(压、温、湿、风)的物理意义和预报应用价值. *气象科技进展*, 2016, 6(5):59-64.  
Tao Z Y, Fan J H, Li K Y, et al. On the physical meaning of 4 basic meteorological elements and applicability to weather forecasting. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(5):59-64.
- [34] Liu W. Statistical relation between monthly mean precipitable water and surface-level humidity over global oceans. *Mon Wea Rev*, 1986, 114:1591-1602.

## Characteristics of Convection-triggering Drylines in the Drainage Area of Huanghe and Huaihe Rivers

Wang Jinlan<sup>1)2)</sup> Yu Xiaoding<sup>3)</sup> Tang Xingzhi<sup>4)</sup> Yu Haijing<sup>1)2)</sup> Hu Liangfan<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (CMA • Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003)

<sup>2)</sup> (Xinxiang Meteorological Bureau of Henan, Xinxiang 453003)

<sup>3)</sup> (China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081)

<sup>4)</sup> (Hubei Branch of China Meteorological Administration Training Center, Wuhan 430074)

### Abstract

Based on the surface and sounding datasets, ERA5 reanalysis data from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the satellite images, the characteristics of convection-triggering drylines in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers of China from April to September during 2010–2019 are analyzed. The result shows that the drylines mainly appear at Dezhou of Shandong, and surroundings in the north of Henan. Most of them are distributed in the quasi northwest-southeast and northeast-southwest direction, with the length of 100–200 km and the width of 50–100 km, and they generally occur at 1400 BT or 1700 BT during the daytime. The drylines mostly occur under the 500 hPa cold vortex located in Northeast China and North China, with convergence lines (or shear lines) on 700 hPa and 850 hPa weather chart, and within the low pressure behind the coastal high on the surface chart. The statistics of the surface elements shows that the temperature on the dry side is 1.9°C higher than that on the wet side, while the dew point temperature on the wet side is 6.8°C higher than that on dry side. The gradient of temperature, dew point temperature and specific humidity on both sides of drylines are  $-2.7^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ ,  $10.1^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ km})^{-1}$  and  $5.9\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (100\text{ km})^{-1}$ , respectively. According to the statistics of sounding environment parameters, precipitable water in the wet side is higher than that on the dry side. The specific humidity on the wet side is higher than that on the dry side at 925 hPa, 850 hPa and 700 hPa. The mean convective available potential energy on the wet side is much larger than that on the dry side. The temperature differences are very small on both sides of the drylines at 850 hPa and 500 hPa, 700 hPa and 500 hPa. The significant difference on both sides of the dry side in convective available potential energy is mainly caused by the difference in water condition of the lower layers in the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers of China. The hydrostatic instability (conditional instability) on both sides of the drylines is similar. Also, the vertical wind shear of 0–6 km is a little bit stronger on wet side than that on the dry side.

**Key words:** the drainage area of Huanghe and Huaihe Rivers; convection-triggering; dryline; statistical analysis