

郑淋淋, 孙建华. 2013. 干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析 [J]. 大气科学, 37 (4): 891–904, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12090. Zheng Linlin, Sun Jianhua. 2013. Characteristics of synoptic and surface circulation of mesoscale convective systems in dry and moist environmental conditions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 891–904.

干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流 背景和地面特征分析

郑淋淋^{1,2} 孙建华¹

¹ 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 对 2007~2010 年暖季 (6~9 月) 发生在江淮和黄淮流域 46 个对流天气过程的环流背景和地面特征进行了统计研究。根据整层可降水量小于或大于等于 50 mm 将这些个例发生的环境分成干环境 (10 个个例) 和湿环境 (36 个个例)。干环境下发生强对流的天气形势可以分为槽后型和副高边缘型, 湿环境下的天气形势可分为槽前型、副高边缘型和槽后型, 湿环境下有明显的暖湿区配合。湿环境下槽前型发生的概率最高, 地面系统较为复杂, 有静止锋、倒槽、冷锋和暖锋, 而干环境下在本研究的个例中无槽前型发生。干、湿环境下副高边缘型的对流, 从地面到 500 hPa 都发生在副高后部的“S”流型的拐弯处, 但部分湿环境个例低层有切变线。干环境下槽后型的发生概率较高, 而湿环境下发生概率则相对较少。由这些研究表明, 干、湿环境下强对流系统的触发和维持机制存在明显的差异。

关键词 江淮和黄淮流域 环流形势 地面特征 “S”流型

文章编号 1006-9895(2013)04-0891-14

中图分类号 P448

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12090

Characteristics of Synoptic and Surface Circulation of Mesoscale Convective Systems in Dry and Moist Environmental Conditions

ZHENG Linlin^{1,2} and SUN Jianhua¹

¹ Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The synoptic circulation and surface characteristics of 46 convective events occurring over the Huaihe River and Yellow River basins from June to September during 2007–2010 are investigated. The related environmental conditions are classified as dry (10 cases) and moist (36 cases) environments according to whether precipitable water is less than, greater than or equal to 50 mm. The synoptic patterns in dry (moist) environments could be classified into post-trough and rim of subtropical high (pre-trough, post-trough, and rim of subtropical high) patterns. In addition, cases in moist environments are frequently accompanied by warm and moist flow. The pre-trough pattern in moist environments is characterized by various surface systems including a stationary front, inverted trough, cold front, and warm front. The pre-trough pattern occurs frequently in moist environments but does not occur in dry environments

收稿日期 2012-06-13, 2012-11-05 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41075032, 中国气象局公益性行业 (气象) 科研专项经费项目 GYHY200906004, 国家重点基础研究规划项目 2010CB951804

作者简介 郑淋淋, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: zhengll2@163.com

通讯作者 孙建华, E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

among the cases studied here. The convective cases are initialized at the corner of the “S” pattern from the surface to 500 hPa for the rim of subtropical high pattern in both dry and moist environments, but some cases in moist environments occur near the shear lines at low levels. The post-trough pattern occurs frequently in dry environments but rarely in moist environments. The aforementioned analyses show that significant differences exist between dry and moist environmental conditions where severe convective systems occur.

Keywords Huaihe River and Yellow River basins, Synoptic circulation, Surface characteristics, “S” pattern

1 引言

中尺度对流系统(MCS)是产生暴雨、冰雹、大风等灾害性天气的主要系统,尤其是线状的中尺度系统造成的天气更为剧烈(Houze, 2004)。对强对流天气的预报不能仅依靠天气尺度的系统,还要注意中尺度系统的触发和组织作用,国内外的相关研究也不少。中国东部地区受东亚季风的影响,呈现独有的气候特点,江淮和黄淮流域是受东亚季风影响最明显的区域之一,江淮流域常有梅雨雨带的活跃。影响这种湿环境下对流系统发生的大尺度系统有:阻高、西风带短波槽、西太平洋副高、切变线和地面静止锋(陶诗言, 1980)。我国对飑线发生环境条件有较系统的研究。丁一汇等(1982)在统计了 18 个飑线个例的基础上,将飑线发生的环流背景分成四种类型:槽前型、槽后型、高压后部型和台风倒槽型,并指出冷锋、切变线、低涡、高空急流、露点锋和低空风场不连续线等都可以对飑线起到触发和组织作用。李鸿洲(1988)分析了发生在华北的百余次飑线过程的环境条件和中尺度特征,基于 500 hPa 流场把飑线发生的背景流场分为西北风和偏南风流型。蔡则怡等(1988)分析了我国华北地区飑线的发生和演变过程,提出了飑线系统发生发展的中尺度模型,并指出其发生在弱的环境风切变和弱的对流不稳定条件下。翟国庆和俞樟孝(1992)根据对华东地区 9 次强对流天气的地面风场分析发现,强对流的发生发展与锋前暖区的中尺度辐合线有密切关系,当有移动的天气系统与其相遇时,交点附近扰动辐合值迅速增大,促使对流迅猛发展且移速加快。

美国大平原地区的对流多发生在较干环境下,多产生大风、龙卷等天气,大尺度影响系统有高空急流、中层短波槽、低层暖平流、地面锋面和干线(Doswell, 1980; Bluestein and Parks, 1983; Parker and Johnson, 2000)。江淮和黄淮流域湿环境下的对流较多,但也有干环境下的对流,例如 2009 年 6 月 3~4 日河南、安徽、江苏发生的大风、冰雹天

气(孙虎林等, 2011)。这种干环境下对流发生在冷涡的后部(梁建宇和孙建华, 2012),其天气形势与梅雨锋上对流系统有明显的差别,与美国大平原地区的干对流也截然不同。以往对干、湿环境下对流发生的天气背景的研究大多针对具体个例,有关大量个例的统计分析涉及较少。本文中我们将深入探讨干、湿环境下对流天气发生是否有不同的高空环流形势和地面特征,不同的天气形势如何影响中尺度系统的活动、产生的天气等。因此研究对流天气发生的天气背景和地面特征对于了解对流系统的活动规律和产生的天气有重要作用,对于对流天气的预报也有重要的意义。

2 资料和方法

不同地区、不同季节中尺度对流系统的背景环流存在多样性,地面特征则更加复杂。本文针对地形比较均一的江淮和黄淮流域(图 1 所示范围)暖季(6~9 月)发生的中尺度对流天气进行统计分析,研究中用到了多普勒雷达组合反射率资料和探空观测资料,这些资料在研究区域的分布见图 1。根据中国气象局国家气象中心提供的强对流风暴资料,共搜集到 2007~2010 年 6~9 月 46 个大范围发生强对流天气个例,即在地面加密观测(每小时一次)和重要天气报中的短时强降雨、大风、冰雹、龙卷等天气现象。由于探空资料的时空分辨率不高,有些个例发生前的探空资料缺乏。采用 6 小时一次的 NCEP-FNL 资料中的整层可降水量进行分析,发现本研究涉及的所有个例并不是都发生在湿背景条件下,有一些个例发生在环境湿度较小的地方。美国发生的中尺度对流系统的环境条件统计表明其整层可降水量都在 20~40 mm 之间(Bluestein and Jain, 1985; Parker and Johnson, 2000; Klimowski et al., 2003),而 Meng and Zhang (2012)统计的台前飑线为 61 mm。本研究中定义可降水量小于 50 mm 为干环境,可降水量大于等于 50 mm 为湿环境,干环境下有 10 个个例,除了 2007 年两个个例发生在 7 月底以外,其他 8 个个例均发生在 6 月(表 1),

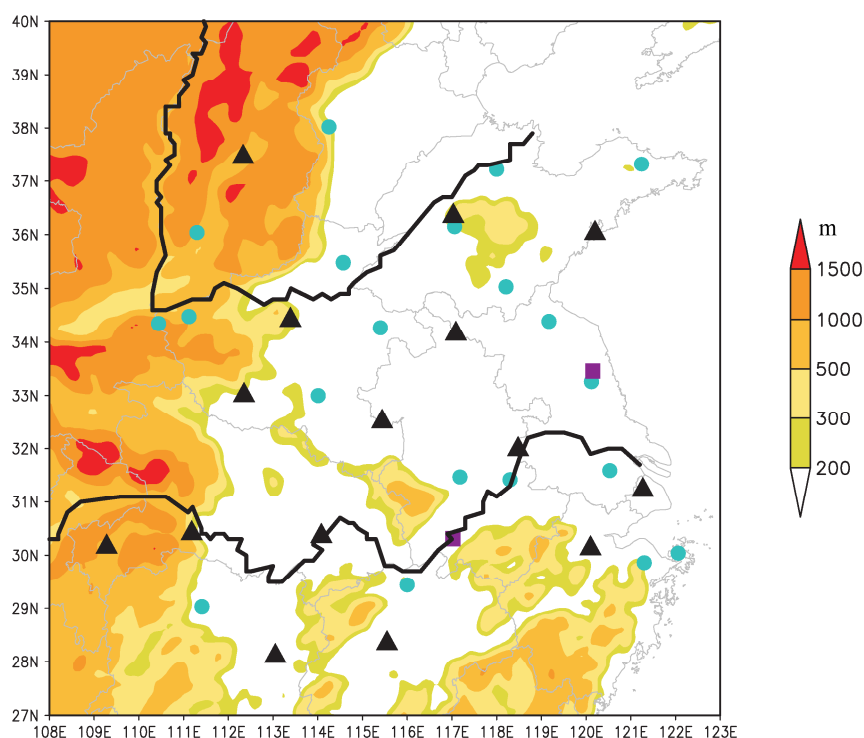


图1 研究区域的多普勒雷达和探空站分布。正方形是探空站；圆圈为多普勒雷达站；三角形为多普勒雷达和探空站。彩色阴影为地形高度大于200 m的区域

Fig. 1 The distribution of radar and upper air radiosonde stations over the Central East China. The squares are radiosonde station; the dots are radar stations; the triangles are both radiosonde and radar stations. The shading represents the elevation higher than 200 m

湿环境下共36个个例(表2)。下面的环流背景分析采用6小时一次的NCEP-FNL资料,根据对流发生前12小时以内的高低空环流配置对干、湿环境下中尺度对流系统的环流背景进行分类。地面分析采用每小时一次的全国地面加密观测资料。

表1 干环境下个例的环流分类

Table 1 The synoptic patterns of cases in dry environments

500 hPa 流型	地面形势	个例	整层可降水量
槽后型	高压与低压之间	2008-06-25	20~25 mm
		2009-06-03	15~20 mm
		2009-06-05	25~30 mm
		2009-06-14	30~35 mm
倒槽		2008-06-03	15~20 mm
		2009-06-14	25~30 mm
暖锋		2008-06-03	25~30 mm
		2009-06-05	25~30 mm
副高边缘型	形势不明显	2007-07-27	40~45 mm
	“S”流型	2007-07-28	45~50 mm

3 干、湿环境下对流发生前的环境参数对比

根据干、湿环境下中尺度对流系统产生天气现

象的分析(Zheng et al., 2012),发现干环境易产生大风和冰雹,湿环境中主要产生强降水,特别是极端强降水(≥ 50 mm/h),基本不产生强风(≥ 24 m/s)和冰雹。强降水伴随冰雹、大风伴随冰雹以及同时产生三种天气现象的系统发生在干环境中,只产生短时强降水的系统基本发生在湿环境中。对干、湿环境下对流系统的生命史等也进行了统计(图2),干环境下发生的MCS的平均持续时间为9.5小时,而湿环境下的MCS平均持续时间为14.8小时,即湿环境中的MCS的生命史比干环境下的系统长5小时。此外,湿环境中MCS的最短和最长生命史都比干环境中长,尤其是长生命史大于20小时的MCS都发生在湿环境中。为了对比干、湿环境条件下对流发生前的环境特征,统计了对流发生前的探空特征。去除探空资料本身有错误以及对流发生前有其他对流发生的情况,共找到30个个例发生前的探空观测资料,其中干环境个例9个,湿环境个例21个。图3对比了干、湿环境下对强对流发生有一定指示意义的参数的统计结果。

抬升凝结高度(PLCL)在干环境中明显高于湿环境(图3a),表明在干环境中气块要被抬升到

表 2 湿环境下个例的环流分类

Table 2 The synoptic patterns of cases in moist environments

500 hPa 流型	地面系统	个例	整层可降水量	500 hPa 流型	地面系统	个例	整层可降水量	
槽前型	冷锋	2007-06-23	60~70 mm	槽前型	倒槽	2010-08-08	60~65 mm	
		2008-07-05	50~55 mm			2010-09-06	60~65 mm	
		2008-07-06	65~70 mm			2010-09-07	60~70 mm	
		2008-07-23	65~70 mm		无	2008-06-20	50~55 mm	
		2009-08-26	55~65 mm			2009-07-30	55~65 mm	
	暖锋	2008-06-20	65~70 mm	副高边缘型	静止锋	2008-08-25	50~60 mm	
		静止锋	2007-06-30			50~60 mm	2009-06-28	60~65 mm
	2007-07-02		65~70 mm	2010-07-17	65~75 mm			
	2007-07-08		65~70 mm	2007-07-06	70~75 mm			
	2007-07-08		70~75 mm	2010-07-13	65~75 mm			
	2007-07-19		70~80 mm	2010-08-02	65~70 mm			
	2007-08-06		60~65 mm	倒槽	2009-08-16	50~60 mm		
	2008-07-01		55~60 mm		低压	2007-07-29	50~60 mm	
	2010-07-08		55~65 mm	2007-08-25		50~55 mm		
	倒槽		2007-07-27	50~55 mm	槽后型	静止锋	2009-07-22	65~75 mm
			2007-08-10	60~65 mm			暖锋	2008-07-21
		2008-09-19	50~55 mm	低压		2009-07-07		65~70 mm
		2009-09-24	50~60 mm			2010-07-08		55~65 mm

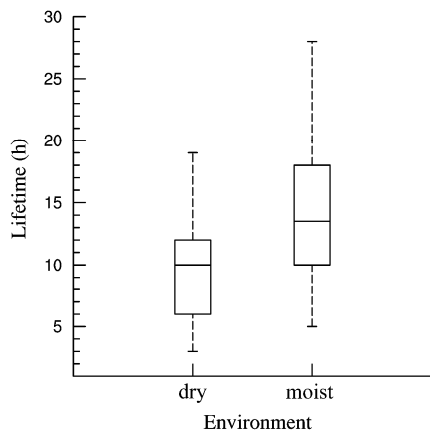


图 2 干、湿环境下中尺度对流系统的生命史 (单位: h)。虚线顶端代表最大值, 虚线底端代表最小值, 盒状顶端代表上四分位数, 盒状中间代表中位数, 盒状底端代表下四分位数

Fig. 2 The lifetimes of mesoscale convective systems in dry and moist environments (units: h). The top and bottom of dashed lines represent the maximum and minimum values, the top, middle, and bottom of boxes represent the upper quartile, median, and lower quartile values

更高的高度才能发生凝结。MUCAPE (most unstable convective available potential energy) 和 SBCAPE (surfaced based convective available potential energy) 的值在干环境中明显大于湿环境 (图 3b,d)。MUCIN (most unstable convective inhibition) 在干环境中较大, 但是 SBCIN (surface based convective inhibition) 在干、湿环境中差别不大 (图 3c, e)。而且干环境中所有个例的 MUCAPE 与 SBCAPE,

MUCIN 与 SBCIN 差别较小。由于液态水在未饱和空气中蒸发或固态水在融化层下面融化都会吸收热量, 使空气冷却, 形成下沉气流。这种下沉气流可能达到的强度与下沉对流有效位能成正比。干环境中的 DCAPE (downdraft convective available potential energy) 大约是湿环境中的两倍 (图 3f)。这可能是造成干环境中容易形成地面大风的原因之一。LI (Lift index) 负值的绝对值越大表示越不稳定。干环境中 LI 的绝对值比湿环境中的大 (图 3g), 这表明相对于湿环境来说, 在干环境中对流的发展需要更强的触发条件。干环境中地面到 300 hPa 整层的可降水量明显小于湿环境, 可降水量在干、湿环境中的平均值分别是 3.20 cm 和 6.15 cm, 湿环境中大约是干环境中的 2 倍 (图 3h)。

通过对探空资料计算出的各种参数的分析表明, 干、湿环境下除了湿度场的差异显著外, 其他对对流系统发生有显著影响的参数也有明显的差异, 这些差异可能导致干、湿环境中的对流系统的组织和维持机制的不同。因此, 本文开展干、湿环境的不同背景环流配置和地面特征研究, 而其组织和维持机制将在今后通过具体个例的分析和数值模拟研究来揭示。

4 干环境下对流发生的天气形势

在统计的 2007~2010 年的个例中, 干环境下

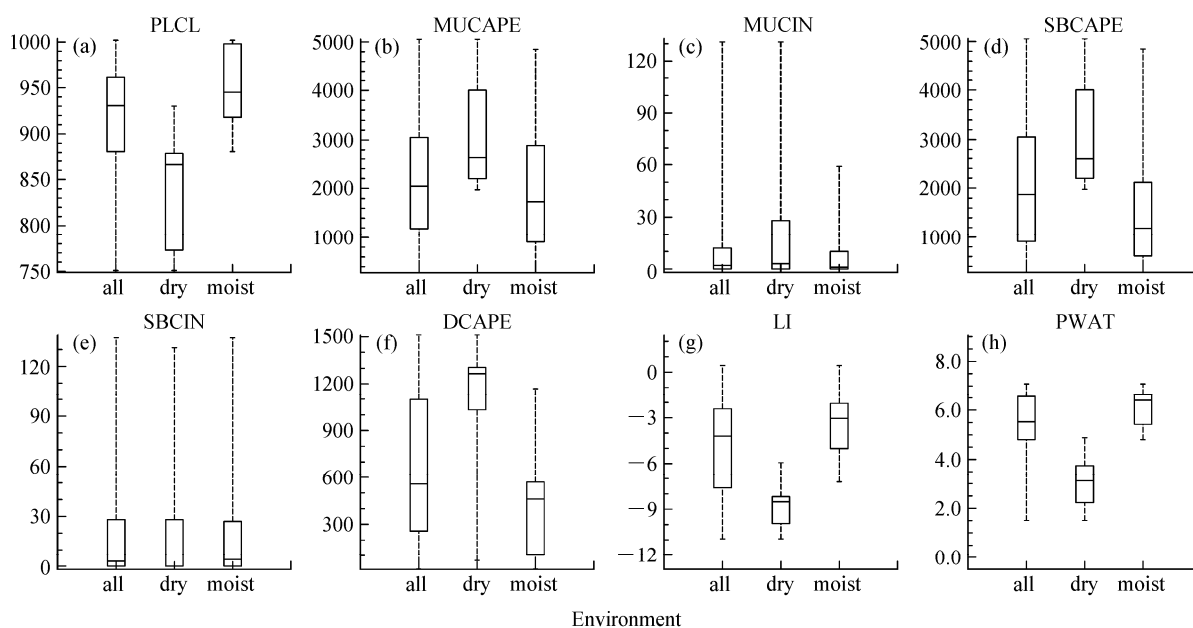


图3 同图2, 但为干、湿环境下对流性天气产生前的物理参数特征: (a) 抬升凝结高度 (PLCL, 单位: hPa); (b) 从最不稳定层抬升的对流有效位能 (MUCAPE, 单位: J/kg); (c) 从最不稳定层抬升的对流抑制能量 (MUCIN, 单位: J/kg); (d) 从地面抬升的对流有效位能 (SBCAPE, 单位: J/kg); (e) 从地面抬升的对流抑制能量 (SBCIN, 单位: J/kg); (f) 下沉对流有效位能 (DCAPE, 单位: J/kg); (g) 地面抬升指数 (LI, 单位: K); (h) 地面到 300 hPa 整层可降水量 (PWAT, 单位: cm)

Fig. 3 As in Fig. 2, but for properties of preconvective environments of cases in dry, moist, and all environments: (a) Lifting condensation level (units: hPa); (b) most unstable CAPE (units: J/kg); (c) MUCIN (units: J/kg); (d) surface based CAPE (units: J/kg); (e) SBCIN (units: J/kg); (f) down draft convective available potential energy (units: J/kg); (g) lifting index (units: K); (h) precipitable water from surface to 300 hPa (units: cm)

有 10 个个例, 表 1 列出了所有个例的发生时间、高低空环流特征和整层可降水量。根据高低空的环流特征, 将这 10 个个例分成两种类型, 分别是槽后型和副高边缘型, 其中槽后型 8 个个例 (2008 年 3 个, 2009 年 5 个), 这些个例全部发生在 6 月份, 副高边缘型 2 个, 都发生在 2007 年的 7 月。

4.1 槽后型

4.1.1 槽后型形势分析

这种类型对流系统发生于 500 hPa 槽后, 500 hPa 上的温度槽落后于高度槽。槽后的西北气流带来干冷空气, 这种上部干冷、下部干热的结构配置类似于美国大平原地区的强对流天气配置 (Carlson and Ludlam, 1968; Hagemeyer, 1988, 1991)。与丁一汇等 (1982) 中的槽后型也类似, 其天气形势一般具有“前倾槽”的结构, 这种结构有利于位势不稳定层结的建立和维持。在对流层中下层的 850 hPa 和 700 hPa, 5 个个例发生在槽前, 1 个个例发生在高压的东北部, 1 个个例发生在 700 hPa 高压前部、槽后部, 850 hPa 高压北部。对流发生在暖区内, 并且没有湿舌对应。干环境下槽后型形势概略图如图 4。

这种类型都具有明显的地面强迫系统, 包括低压与高压之间、倒槽、暖锋等 (图 4)。8 个个例中有 4 个发生在地面高压和低压之间。地面高压是中高压或者尺度比较大的冷高压, 并且高压都是冷性的, 其中 2 个个例有明显的边界出流。有 2 个槽后型个例的地面形势是倒槽, 倒槽的前部或者后部也伴有冷高压存在, 对流发生在高压和倒槽之间。有 2 个槽后型个例的地面形势是暖锋, 其中一个个例暖锋的北部伴有冷高压, 对流发生在高压和暖锋之间, 另一个个例发生在暖锋北部的冷区内。这种对流发生在高压和低压之间的流型, 类似于许焕斌和田利庆 (2008) 提出的有利于强对流云的发生和维持的中低层“S”流型 (在旋转过程中有辐合)。“S”字的主入流区, 它近于直线地进入云中, 构成这里是强辐合弱转动的态势; 而在两个勾处, 即高压后部和低压前部是强旋转。这种既旋转又辐合的流型可以提供稳定的倾斜上升气流, 有利于对流的维持 (许焕斌和田利庆, 2008)。Miller et al. (1990) 也观测到了这种流型。下面以 2009 年 6 月 14 日个例为例

分析干环境下个例的特征。

4.1.2 2009年6月14日干环境个例分析

2009年由于东北低涡活跃(孙建华等, 2011), 东北低涡后部的冷空气经常影响华北和江淮地区, 导致2009年6月发生了多次强对流天气。本文统计的10个干环境发生的个例中, 有4个发生在2009年6月(表1), 其中6月3~4日的个例产生了29.1 m/s的地面大风, 也是一次典型的发生在干环境中的强对流天气(梁建宇和孙建华, 2012)。2009年6月14日发生在河南和安徽地区的强对流天气造成了强降水、大风和冰雹天气, 用NCEP-FNL资料计算出对流发生地区的可降水量在30~35 mm之间, 为干环境下的槽后型个例(表1)。强降水主要发生在14日19时(北京时, 下同)至15日02时, 其中14日21时出现63 mm/h的最强降水(图5a)。大风主要发生在14日21~22时, 过程最强风速为19 m/s(图5b), 冰雹主要发生在14日18~21时(图5b)。

从环流形势看, 500 hPa高纬度地区是两槽一脊形势, 贝加尔湖地区为高压脊控制, 乌拉尔山以东和鄂霍次克海为低压控制。由鄂霍次克海低压延伸出来的大槽位于日本西部洋面上。温度槽落后于高度槽, 强对流发生的河南和安徽地区位于冷涡后部, 受干冷气流控制(图6a)。700 hPa, 湖北地区受高压控制, 对流发生的地区(河南和安徽)位于高压东北部的干区(图6b)。850 hPa河南东部存在暖切变线, 对流发生在暖切变线南段的偏南气流中, 但为干区(图6c)。地面上, 河南地区受低压控制, 14时在低压的东北部和北部有冷空气侵入, 16时低压东北部和北部的温度继续降低, 形成尺度比较小的局地中高压, 另外河南西部也出现了局地的冷性中高压(图7)。对流发生在低压和高压交界处的干暖区, 对应18时在河南出现了3个局地对流区。

4.2 副高边缘型

10个干环境的个例中只有2个是副高边缘型, 这2个个例都发生在2007年7月, 其整层的水汽含量比6月发生的个例要大(表1)。副热带高压在沿海地区稳定或者西伸时, 在高压脊附近的暖切变处有对流性天气产生, 这种对流性天气多呈现局地性、短时性, 且多产生冰雹和大风天气。对流层中低层(图8)副高的西部有低压或者槽, 对流性天气出现在副高脊线附近或北部的暖切变中。受副高的影响, 对流性天气出现的区域是暖区, 但离副高

西部边缘的湿舌较远, 所以这种对流天气发生时的水汽不充足, 不易产生强降水天气, 且维持时间较短。从地面到500 hPa, 高压的西部边界的等高线有向高压内部突出的部分, 而对流就出现在这个凸起的北部, 这个微小的凸起使流场也具有“S”流型的特征。地面上在高压的西部也呈现“S”流型, 对流发生在“S”流型的转弯处。干环境下副高边缘型高低空形势概略图见图8。这种类型个例比较少而且呈短时性, 这里就不再给出具体的个例分析。

5 湿环境下对流发生的天气形势

湿环境下有36个个例(表2), 按照500 hPa的形势划分为槽前型(26个个例), 副高边缘型(6个个例)和槽后型(4个个例)。槽前型对应的地面系统主要有静止锋、倒槽、冷锋、低压、暖锋, 但仍有2个个例在地面没有分析出有利于对流触发和维持的系统。副高边缘型对应的地面形势有静止锋、倒槽和低压。槽后型对应的地面形势有低压、静止锋和暖锋。定义低压的地面形式是没有形成锋面的中小尺度或天气尺度低压。

5.1 槽前型

5.1.1 槽前型形势分析

此类系统共有26个个例, 在湿环境下发生的对流个例中比例最高。此类个例对流发生在对流层中层(500 hPa)槽前的暖湿气流中。700 hPa和850 hPa的天气形势一般是切变线或者槽(有的个例伴随有低涡)。850 hPa和700 hPa均是切变线的个例有20个, 850 hPa和700 hPa均是槽线的个例只有1个, 槽线呈西北—东南向。对流一般发生在切变线或槽前的偏南气流中, 偏南气流带来暖湿空气, 形成暖湿舌, 对流容易出现在暖湿舌的右侧。湿环境下槽前型的环流特点是各层都有明显的有利于对流发生的系统, 暖湿气流的作用比较明显, 其中有4个个例在850 hPa出现了急流。这种类型的环流配置如图9。

湿环境槽前型的地面系统相对于干环境来说比较复杂, 静止锋个例8个(30.8%), 倒槽7个(26.9%), 冷锋5个, 低压3个, 暖锋1个, 还有2个个例地面系统没有分析出锋面或者低压。对于静止锋系统, 一般为东北东—西南西走向, 静止锋的北面是偏东风、冷区, 南面是偏南风、暖区。50%个例出现在静止锋北侧偏东气流的冷区中, 另一半个例出现在静止锋南部的偏南暖湿气流中。对于地

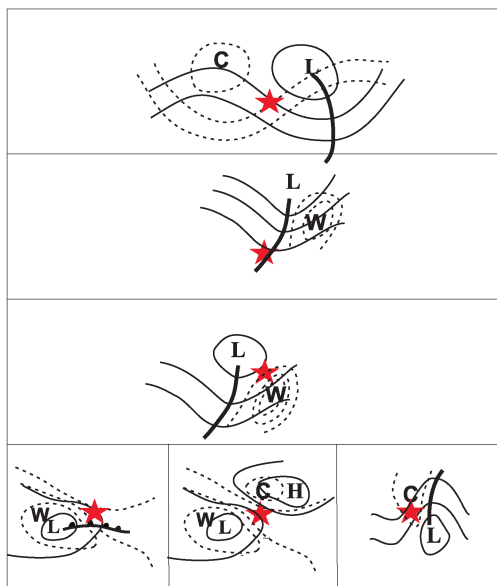


图 4 干环境下槽后型形势概略图。地面系统有三种：暖锋(左)、高压与低压之间(中)、倒槽(右)。“C”代表冷，“W”代表暖，“L”代表低压，“H”代表高压，五角星代表对流发生的位置

Fig. 4 Schematic diagram of the post-trough pattern in dry environments. Three types of surface systems: warm front (left), between high and low pressure (middle), inverted trough (right). “C” represents cold, “W” represents warm, “L” represents low pressure, “H” represents high pressure, and pentagram represents the initial location of convection

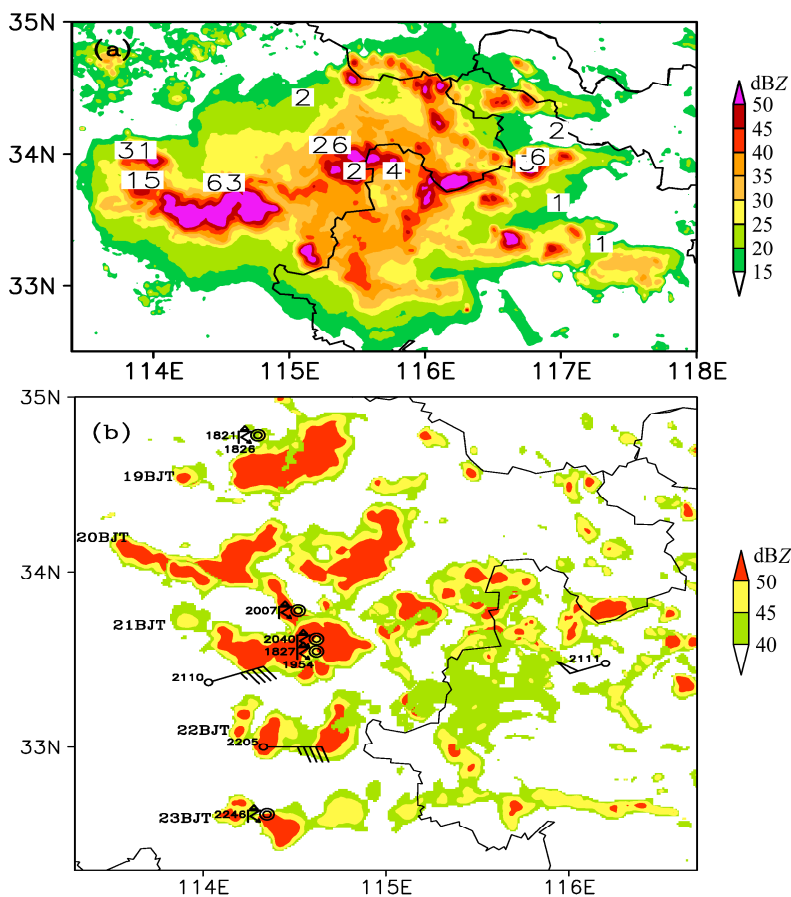


图 5 2009 年 6 月 14 日河南、安徽强对流天气过程：(a) 14 日 21 时雷达组合反射率（阴影，单位：dBZ）和每小时降水量（数字，单位：mm/h）；(b) 14 日 19~23 时的雷达组合反射率（阴影，单位：dBZ）演变和大风、冰雹天气（站点上的数字代表大风或冰雹天气发生的时间；全风向杆代表 4 m/s）

Fig. 5 Severe convective weather in Henan and Anhui provinces on 14 June 2009: (a) Radar composite reflectivity (shaded, units: dBZ) and the hourly precipitation amount (numbers, units: mm/h) at 2100 BT (Beijing Time); (b) the evolution of radar composite reflectivity (shaded, units: dBZ), high wind and hail reports (numbers at stations represent the Beijing time of high wind or hail occurrence, and the full barb represents 4 m/s) during 1900–2300 BT

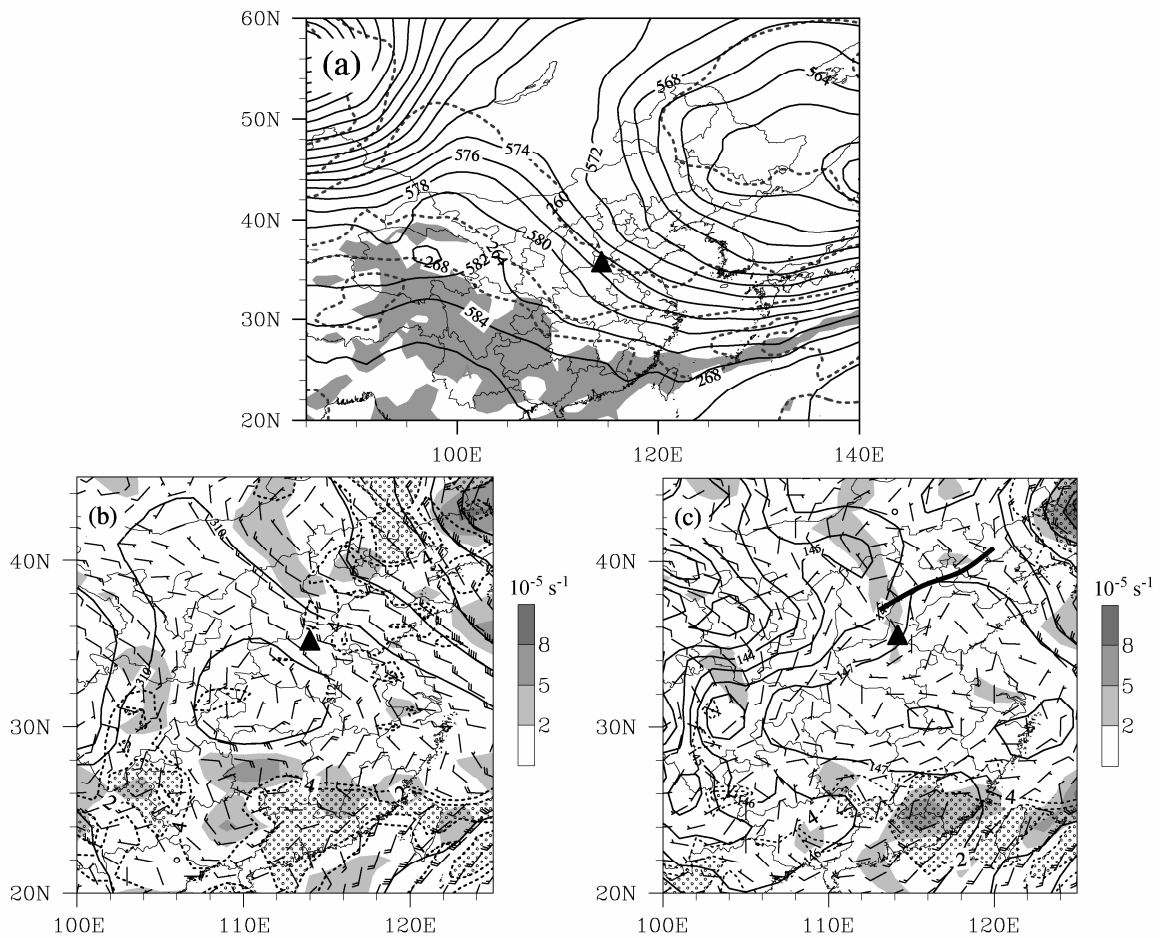


图 6 2009 年 6 月 14 日 14 时环流场特征: (a) 500 hPa 位势高度 (实线, 单位: dagpm)、温度 (虚线, 单位: K) 和比湿大于等于 4 g/kg 的区域 (阴影); (b) 700 hPa 的位势高度 (实线, 单位: dagpm)、正涡度区 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和温度露点差 (虚线, 单位: K, 其中圆点填充为温度露点差小于等于 2 K 的区域); (c) 同图 (b), 但为 850 hPa。黑色粗实线为切变线, 三角形为对流发生的区域, 全风向杆代表 4 m/s

Fig. 6 The synoptic circulation at 1400 BT 14 June 2009: (a) Geopotential height (solid line, units: dagpm), temperature (dashed line, units: K), and specific humidity $\geq 4 \text{ g/kg}$ (shaded) at 500 hPa; (b) geopotential height (solid line, units: dagpm), positive vorticity (shaded, units: 10^{-5} s^{-1}), and depression of the dew point (dashed line, units: K, areas with values $\leq 2 \text{ K}$ were shaded with dots) at 700 hPa; (c) as in (b), but for 850 hPa. The black thick solid line represents shear line; the triangle represents the initial location of convection; the full barb represents 4 m/s

面冷锋系统, 4 个个例发生在冷锋后部的冷区中, 1 个个例发生在冷锋前部的暖区。对于地面倒槽系统, 4 个个例发生在槽西部冷区的偏北气流中, 3 个个例发生在倒槽东部暖区的偏南气流中。一个地面暖锋个例出现在锋面北部的冷区中。以上地面特征分析表明, 锋面或者倒槽的暖区和冷区都能发生对流。由于这种类型的地面形势以倒槽和静止锋居多 (占一半以上), 下面选取一个静止锋的典型个例进行具体分析。

5.1.2 2007 年 7 月 8~9 日地面静止锋个例分析

2007 年的梅雨期是一次典型的梅雨偏多年 (赵思雄等, 2007), 其中第 2 阶段强降雨时段 (6 月 29 日~7 月 10 日) 降水最强, 影响最大, 而在第 2

阶段的 4 次降水过程中以 7 月 7~9 日的降水最强。2007 年 7 月 8 日 15 时至 9 日 16 时江淮流域出现了强对流天气过程, 影响湖北中东部, 河南南部, 安徽中部, 江苏西南部, 造成强降水天气 (图 10a), 其中湖北钟祥站 8 日 14~20 时出现了 122 mm 的降水量, 过程总降水量达到 163 mm (图 10a), 江苏大丰站 09 日 02~08 时出现了 129 mm 的降水量。用 NCEP-FNL 资料计算出对流发生地区环境的可降水量在 70 mm 以上, 是一次明显的湿环境个例。

从环流场来看, 500 hPa 上, 中高纬地区, 贝加尔湖及其以东的地区为低压槽, 中亚地区地区受高压脊控制。四川东部到云南中部受低槽控制, 湖北中部位于槽前, 比湿大于等于 4 g/kg (图 10b)。

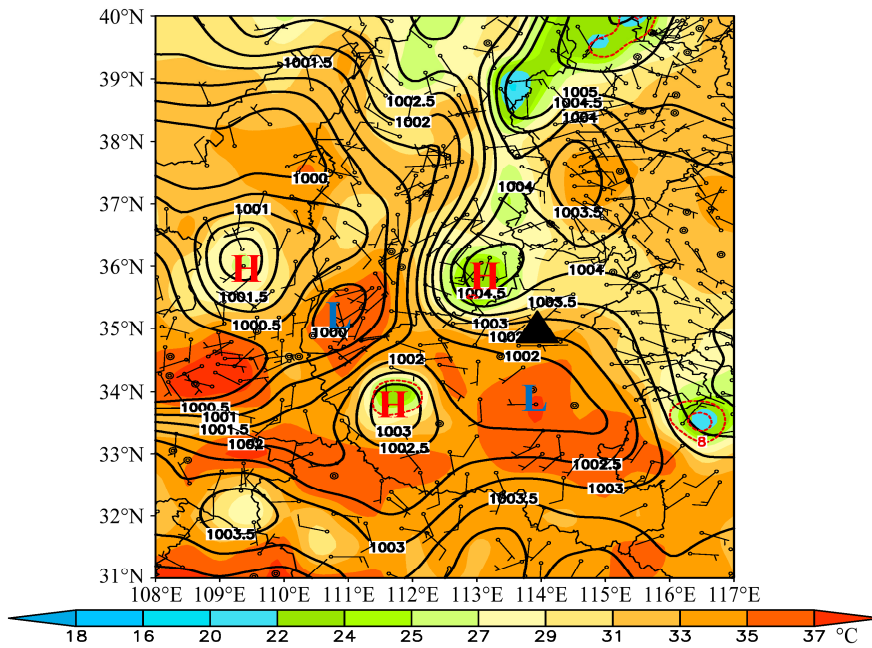


图 7 2009 年 6 月 14 日 16 时地面分析场：温度（阴影，单位：℃）；海平面气压（黑色实线，单位：hPa）；温度露点差（红色虚线，单位：℃）；全风向杆代表 4 m/s。“H”代表中高压；“L”代表低压；三角形为对流发生的区域

Fig. 7 Surface field at 1600 BT 14 June 2009: Temperature (shaded, units: °C); sea surface pressure (black solid line, units: hPa); depression of the dew point (red dashed line, units: °C); the full barb represents 4 m/s. “H” represents meso-high; “L” represents low pressure; triangle represents the initial location of convection

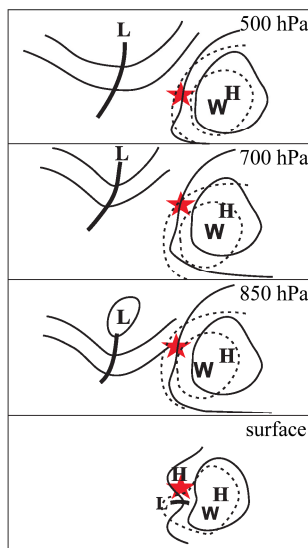


图 8 干环境下副高边缘型高低空形势概略图。“C”代表冷；“W”代表暖；“L”代表低压；“H”代表高压；五角星代表对流发生的位置

Fig. 8 Schematic diagram of the rim of subtropical high pattern in dry environments. “C” represents cold; “W” represents warm; “L” represents low pressure; “H” represents high pressure; pentagram represents the initial location of convection

700 hPa, 东西向的准静止锋从陕西南部经河南中部、安徽北部一直延伸的江苏中部, 温度露点差小于等于 2 K 的区域平行于静止锋并位于其南部, 对流发生在静止锋的南部、湿舌的内部 (图 10c)。850

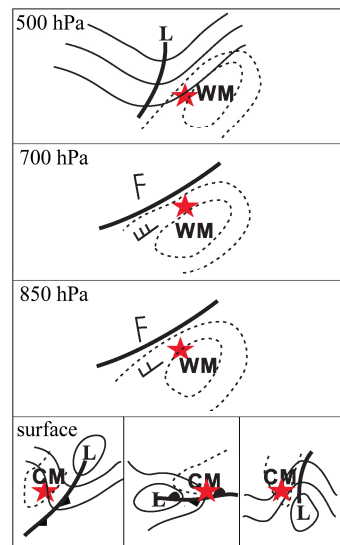


图 9 湿环境下槽前型的高低空形势概略图。地面系统有三种：冷锋（左）；暖锋或静止锋（中）；倒槽（右）。“C”代表冷，“W”代表暖，“M”代表湿，“L”代表低压，五角星代表对流发生的位置

Fig. 9 Schematic diagram of the pre-trough pattern in moist environments. Three types of surface systems: Cold front (left), warm or stationary front (middle), inverted trough (right). “C” represents cold, “W” represents warm, “M” represents moist, “L” represents low pressure, “H” represents high pressure, and pentagram represents the initial location of convection

hPa, 湖北中部有低涡, 切变线向东延伸到日本南

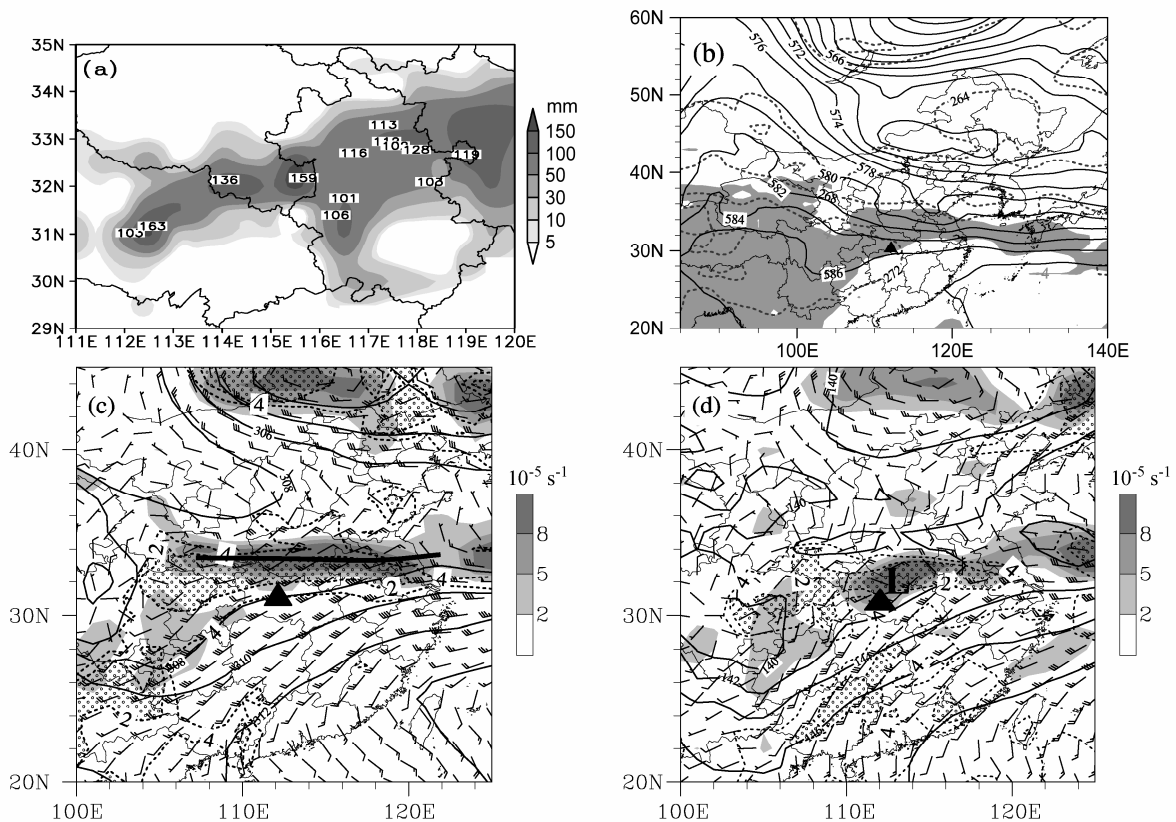


图 10 (a) 2007 年 7 月 8 日 15 时至 9 日 15 时的累积降水量 (单位: mm), 站点上数字表示累积降水量大于等于 100 mm; (b)-(d) 同图 6 (a)-(c), 但为 2007 年 7 月 8 日 14 时各层天气形势, “L” 代表低涡

Fig. 10 (a) Accumulated precipitation amount during 1500 BT 8 July–1500 BT 9 July 2007 (units: mm), numbers on stations represent accumulated precipitation amount ≥ 100 mm; (b)-(d) as in Fig. 6 (a)-(c), but for synoptic pattern at 1400 BT 8 July 2007, “L” represents vortex

部, 温度露点差小于等于 2 的区域平行于切变线并位于其南部, 对流发生在湖北中部低涡的东南部、湿舌的内部 (图 10d)。此次降水过程高低空急流的作用明显, 这与王勇等 (2012) 的结论一致。地面低压带位于长江流域, 在低压带上存在东西向的静止锋, 对流发生在湖北省中部, 位于锋面南侧的暖区中 (图 11)。

5.2 副高边缘型

5.2.1 副高边缘型形势分析

与干环境下副高边缘型对应, 湿环境下在副高的西北部边缘会出现短时的对流性天气。湿环境下副高边缘型的个例有 6 个。与干环境下不同的是, 500 hPa 上副高西北部的偏南风气流带来暖湿空气, 使整层的水汽含量较高, 这与丁一汇等 (1982) 的高后型一致。850 hPa 和 700 hPa 副高西北部边缘常有 “S” 流型出现 (6 个个例中有 4 个), 另外 2 个个例则有切变线出现, 影响系统很清楚并常伴随暖湿舌。地面系统相对干环境来说比较明

显, 有静止锋 (3 个)、倒槽 (1 个)、低压 (2 个), 4 个位于冷区, 2 个位于暖区。总的来说, 此类系统发生时, 850 hPa 到 500 hPa 有暖湿舌配合, 地面有明显的环流系统, 湿环境下副高边缘型的环流配置如图 12。通过目前的分析, 除了湿度场和暖湿舌外, 湿环境下的副高边缘型与干环境下的差异不大, 需要今后收集更多个例和个例的深入分析来揭示它们的异同。

5.2.2 2010 年 7 月 13 日个例分析

2010 年 7 月 13 日 03~22 时长江中下游地区产生了一次强降水过程, 主要影响湖北东部、安徽南部、江西和浙江北部, 其中安庆市出现了大暴雨, 06~07 时的一小时降水量达到了 93 mm, 02~08 时六小时降水量达到 200 mm, 整个过程累积降水量达到 300 mm (图 13a)。雨带维持在长江中下游, 强降水中心一直维持在安徽南部。

从环流场来看, 2010 年 7 月 13 日 02 时, 500 hPa 中高纬度地区是两槽一脊的形势, 鄂霍次克海

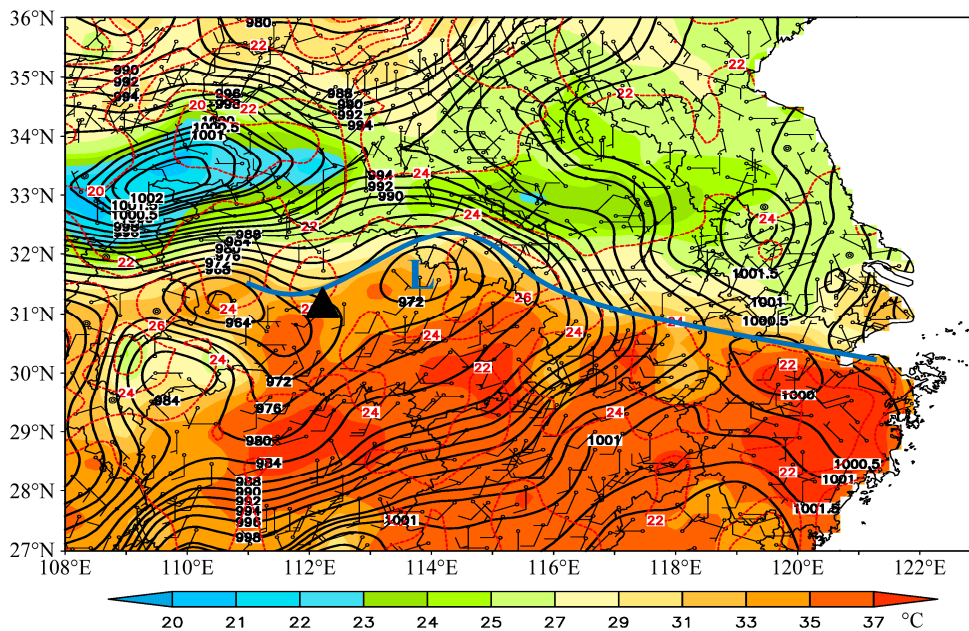


图 11 同图 7，但为 2007 年 7 月 8 日 14 时地面形势，蓝色粗实线代表准静止锋
 Fig. 11 As in Fig.7, but for surface field at 1400 BT 8 July 2007. The blue thick solid line represents quasi-stationary front

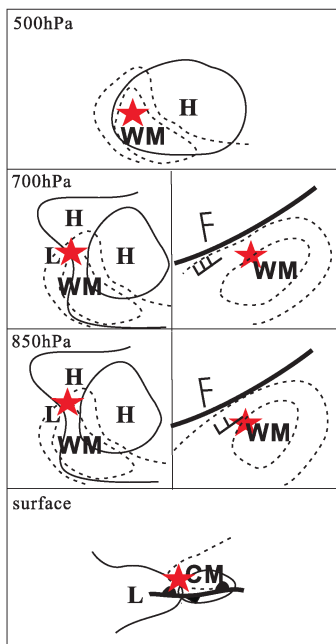


图 12 湿环境下副高边缘型的高低空环流配置，地面系统：静止锋。“W”代表暖，“M”代表湿，“L”代表低压，“H”代表高压，五角星代表对流发生的位置

Fig. 12 Schematic diagram of the rim of subtropical high pattern in moist environments. Surface system: stationary front. “W” represents warm, “M” represents moist, “L” represents low pressure, “H” represents high pressure, and pentagram represents the initial location of convection

和乌拉尔山以东分别受槽控制，贝加尔湖地区受脊控制，我国东北地区的低压也较强，在我国东部沿

海地区形成槽。我国南部大部分地区受副热带高压控制。对流发生的长江中下游地区位于副高北侧、东部沿海槽的后部南侧，这样使得槽后部的冷空气和副高西部的暖湿空气在长江中下游地区汇合，有利于对流天气发生，长江中下游地区位于比湿大于等于 4 g/kg 的地区（图 13b）。850 hPa 的形势与 700 hPa 的形势相似，切变线从河南南部经安徽中部、江苏中部向东一直延伸到日本南部，湿舌（温度露点差小于等于 2 K 的区域）位于切变线的南部的偏南气流中。长江中下游地区位于切变线南部的偏南气流中和湿舌的内部（图 13c, d）。地面上 13 日 00 时，东北—西南向的准静止锋从湖南中部经江西西北部、安徽南部一直延伸到江苏南部，13 日 02 时（图 14）位于江苏南部和安徽南部准静止锋上的低压加强，对流发生在安徽南部低压的暖区中。

5.3 槽后型

与干环境下的槽后型类似，湿环境下在 500 hPa 槽后部的偏北气流中也有对流性天气发生，但只有 4 个个例发生，发生的概率比干环境中小的多。湿环境下的槽后型发生在可降水量大于等于 50 mm 的环境中，且中低层有明显的湿舌配合，对应的中低层系统和干环境也有明显的不同。500 hPa 的温度槽落后于高度槽，对流发生的地区常位于冷、湿地区。850 hPa 和 700 hPa 上的系统是切变线，切变

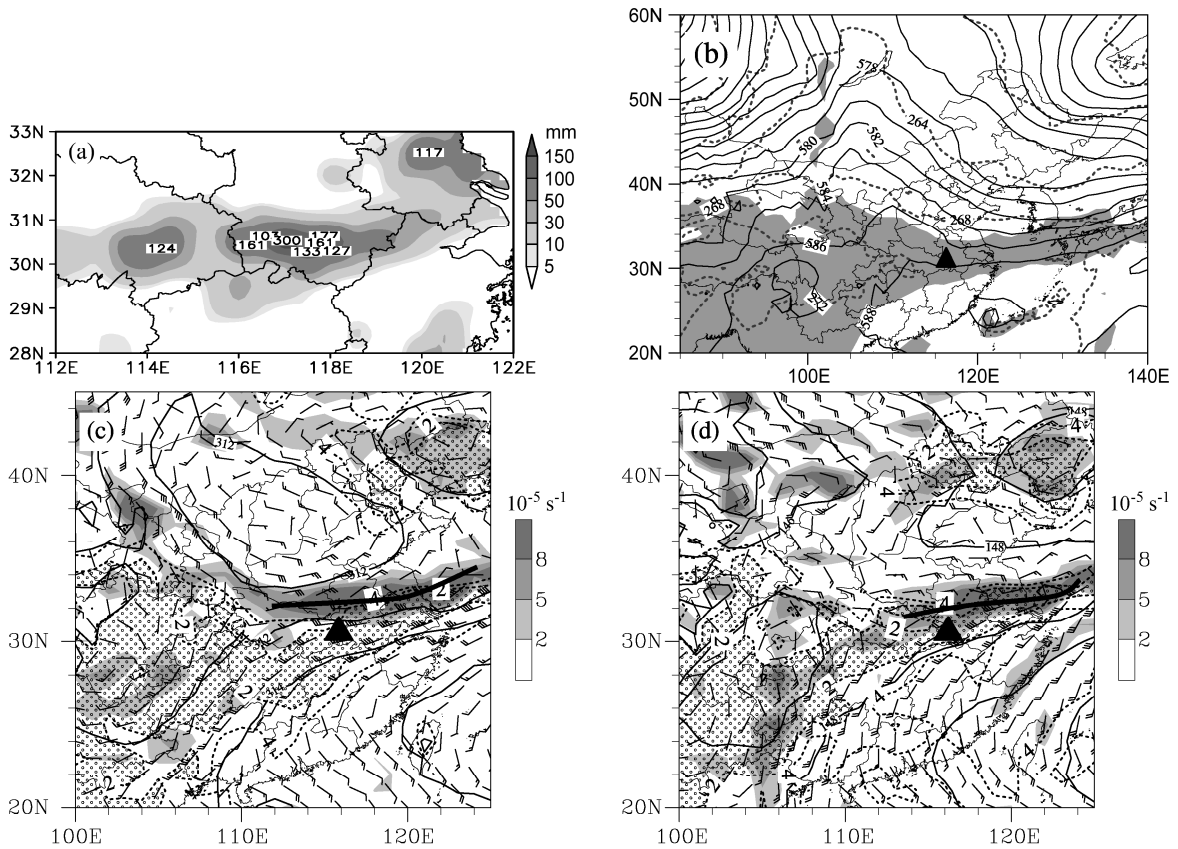


图 13 同图 10，但为 (a) 2010 年 7 月 13 日 02~20 时的累积降雨量 (单位: mm) 和 (b)-(d) 2010 年 7 月 13 日 02 时各层的环流形势
Fig. 13 As in Fig.10, but for (a) accumulated precipitation amount during 0200-0020 BT 13 July 2010 (units: mm) and (b)-(d) synoptic pattern at 0200 BT 13 July 2010

线上有时有低涡发展，对流发生在切变线南部的偏南气流中，对应有暖湿舌。对应的地面系统有低压 (2 个)、暖锋 (1 个) 和静止锋 (1 个)。地面低压个例均发生在低压的东部，暖锋或静止锋的个例均发生在锋面北侧的偏东气流的冷区中。湿环境下槽后型的环流配置如图 15。由于湿环境下的槽后型个例不多，这里就不再举例分析。湿环境下槽后型发生对流的控制因子可能与干环境下不同，为什么在湿环境下槽后发生对流的概率明显减小？需要今后通过个例的深入研究来揭示。

6 结论与讨论

对 2007~2010 年暖季 (6~9 月) 发生在江淮和黄淮流域的 46 个对流性天气个例进行环流背景和地面形势分析。按照整层可降水量小于或大于等于 50 mm 将这些个例发生的环境分成干环境和湿环境。得到 10 个干环境个例和 36 个湿环境个例，统计结果表明干、湿环境下发生的 MCS 的生命史

和产生的天气现象明显不同，干环境下的 MCS 生命史短，容易发生大风和冰雹天气，而湿环境下的 MCS 生命史长，容易发生强降雨天气。干环境下发生强对流的天气形势可以分为槽后型和副高边缘型，湿环境下的天气形势可以分为槽前型、副高边缘型和槽后型。干环境下主要为槽后型，本文统计的个例中无槽前型发生，而湿环境下槽前型发生的概率最高，槽后型发生概率则相对较少。

干环境下槽后型的特点主要是对流发生在 500 hPa 槽后、700 hPa 和 850 hPa 槽底部或前部，地面系统主要有高压和低压之间、暖锋和倒槽。湿环境下槽后型的 700 hPa 和 850 hPa 主要的影响系统是切变线，地面系统是低压、暖锋和静止锋，对流发生的区域常有暖舌和湿舌配合。干环境下副高边缘型的对流呈现短时性和局地性，从地面到 500 hPa 对流均发生在副高后部的“S”流型的拐弯处，这也是湿环境下副高边缘型的主要流型，但也有部分湿环境个例 700 hPa 和 850 hPa 的影响系统为切变

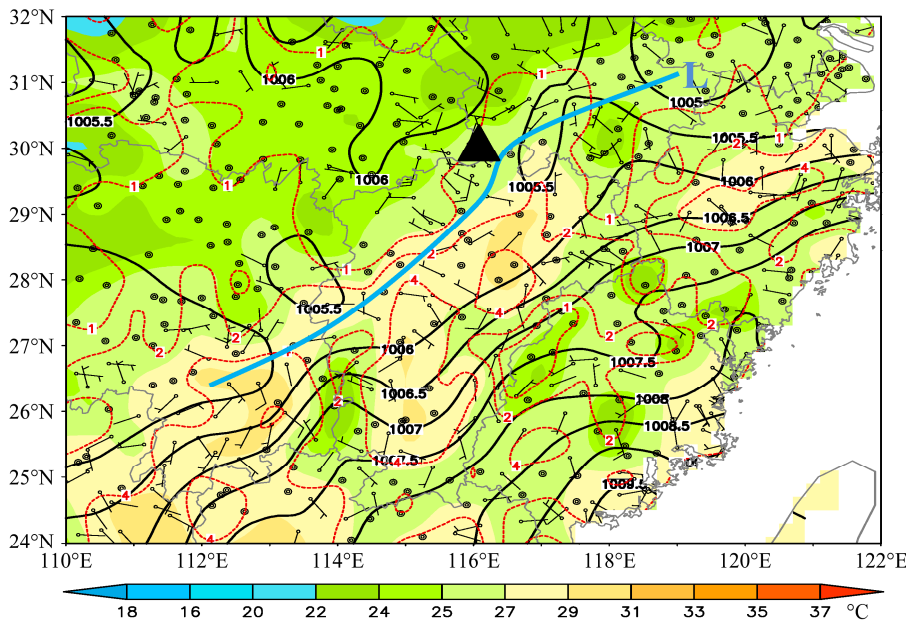


图 14 同图 7，但为 2010 年 7 月 13 日 02 时地面场特征

Fig. 14 As in Fig. 7, but for surface field at 0200 BT 13 July 2010

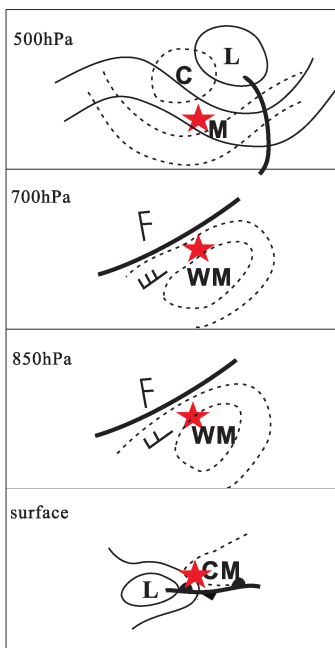


图 15 湿环境下槽后型的高低空环流配置，地面系统：暖锋或静止锋。“C”代表冷，“W”代表暖，“M”代表湿，“L”代表低，五角星代表对流发生的位置

Fig. 15 Schematic diagram of the post-trough pattern in moist environments. Surface systems: warm or stationary front. “C” represents cold, “W” represents warm, “M” represents moist, “L” represents low pressure, and pentagram represents the initial location of convection

线，且伴有暖舌和湿舌。湿环境下的槽前型对流发生在 500 hPa 槽前部，700 hPa 和 850 hPa 的系统主要是切变线，地面系统主要有静止锋、倒槽、冷锋和暖锋，对流常发生在暖舌和湿舌的内部。

本文通过对干、湿环境下探空资料计算出的各种参数、环流形势和地面特征的分析表明，干、湿环境下对流发生时，除了湿度场的差异显著外，环流背景条件和地面特征也有明显的差异，这些差异可能导致干、湿环境中对流系统的触发和维持机制不同。在干环境中的环流背景只有槽后型和副高边缘型，而且以槽后型为主，其个例中对流有效位能最小的都大于 2000 J/kg，表明在干环境下，只要有触发条件使对流有效位能释放，对流有效位能就能使对流发展起来并维持一段时间。而在湿环境下，能形成强对流天气的天气形势和地面特征较为复杂，而且不同的个例对流有效位能的值相差较大，这表明在湿环境下有一些个例不是单由已存在的对流有效位能的释放启动和维持的，且由于在湿环境下的强对流个例都有强降水发生，因此，当地面和低层的锋面、辐合线等启动了上升运动后，降雨过程中释放的凝结潜热释放成为对流维持的主要能源。在湿环境下，对流有效位能、凝结潜热可能共同影响对流的强度和维持时间。这表明，干环境不稳定能与湿不稳定能释放的动力特征不同。干不稳定能能量的积累比较大，且其中可以包含较多成分的浮升能量，一旦存在触发条件（由于浮升能量可主动、先行，这种情况下触发条件可能不需要很强），对流有效位能就能得到释放，对流有效位能本身维持对流发展，这也可能是导致这类系统不能维持很长时间的原因之一。湿不稳定能

的积累相对于不稳定能较小,要有比较强的触发机制才能使能量释放(观测到这类系统的低层有明显的锋面、辐合线等触发系统),由于湿度较大、水汽充足,湿不稳定能释放后水汽凝结潜热的加入提供了对流发展的能量。需要今后采用较多个例的加密观测资料和数值试验来分析在湿环境下强对流系统的触发和维持机制与干环境下的异同。在地面分析中发现中高压和大尺度的冷高压对对流的产生有重要作用,这类系统是否是对流的触发系统目前还不能完全确定,只是有一些个例清楚地显示这类系统在对流发生前就已经存在,有些个例由于资料的分辨率有限目前的分析中没有发现这类系统,这需要时间和空间分辨率更高的地面资料来分析。此外,本文统计的时间较短,今后可在进一步搜集更多年份和更高分辨率资料的基础上来统计对流发生的环流背景条件和地面特征。

参考文献 (References)

- Bluestein H B, Parks C R. 1983. A synoptic and photographic climatology of low-precipitation severe thunderstorms in the Southern Plains [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111 (10): 2034–2046.
- Bluestein H B, Jain M H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (16): 1711–1732.
- 蔡则怡, 李鸿洲, 李焕安. 1988. 华北飚线系统的结构与演变特征 [J]. *大气科学*, 12 (2): 191–199. Cai Zeyi, Li Hongzhou, Li Huan'an. 1983. Structure and evolution of squall line systems in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 12 (2): 191–199.
- Carlson T N, Ludlam F H. 1968. Conditions for the occurrence of severe local storms [J]. *Tellus*, 20 (2): 203–226.
- 丁一汇, 李鸿洲, 章名立, 等. 1982. 我国飚线发生条件的研究 [J]. *大气科学*, 6 (1): 18–27. Ding Yihui, Li Hongzhou, Zhang Mingli, et al. 1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 6 (1): 18–27.
- Doswell C A III. 1980. Synoptic-scale environments associated with high plains severe thunderstorms [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61 (11): 1388–1400.
- Hagemeyer B C. 1988. Tradewind easterlies as a source of extreme potential-convective instability for mid-latitude severe storm generation [D]. M. S. thesis, University of Missouri, 226pp.
- Hagemeyer B C. 1991. A lower-tropospheric thermodynamic climatology for March through September: Some implications for thunderstorm forecasting [J]. *Wea. Forecasting*, 6 (2): 254–270.
- Houze R A Jr. 2004. Mesoscale convective systems [J]. *Rev. Geophys.*, 42: RG4003, doi:10.1029/2004RG000150.
- Klimowski B A, Bunkers M J, Hjelmfelt M R, et al. 2003. Severe convective windstorms over the Northern High Plains of the United States [J]. *Wea. Forecasting*, 18 (3): 502–519.
- 李鸿洲. 1988. 区域地面天气图上华北飚线的特征及其临近预报 [J]. *大气科学*, 12 (1): 42–48. Li Hongzhou. 1988. The characteristics of squall line in North China on hourly surface charts and its nowcasting [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 12 (1): 42–48.
- 梁建宇, 孙建华. 2012. 2009年6月一次飚线过程灾害性大风的形成机制 [J]. *大气科学*, 36 (2): 316–336. Liang Jianyu, Sun Jianhua. 2012. The formation mechanism of damaging surface wind in squall line in June 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 316–336.
- Meng Z Y, Zhang Y J. 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (2): 445–470.
- Miller L J, Tuttle J D, Foote G B. 1990. Precipitation production in a large Montana hailstorm: Airflow and particle growth trajectories [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (13): 1619–1646.
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (10): 3413–3436.
- 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 等. 2011. 2009年6月3~4日黄淮地区强飚线成熟阶段特征分析 [J]. *大气科学*, 35 (1): 105–120. Sun Hulin, Luo Yali, Zhang Renhe, et al. 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3–4 June 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (1): 105–120.
- 孙建华, 卫捷, 赵思雄, 等. 2011. 2009年夏季异常天气及其环流分析 [J]. *气候与环境研究*, 16 (2): 209–220. Sun Jianhua, Wei Jie, Zhao Sixiong, et al. 2011. The abnormal weather and its circulation in summer of 2009 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (2): 209–220.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 100pp. Tao Shiyuan. 1980. *The Heavy Rain in China* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 100pp.
- 王勇, 丁治英, 李勋, 等. 2012. 2007年7月7~9日淮河流域梅雨锋雨带特征分析 [J]. *气象科学*, 32 (1): 45–52. Wang Yong, Ding Zhiying, Li Xun, et al. 2012. The analysis on the feather of the rain-band along Meiyu front in Huaihe River basin from July 7 to 9 2007 [J]. *Journal of the Meteorological Science (in Chinese)*, 32 (1): 45–52.
- 许焕斌, 田利庆. 2008. 强对流云中“穴道”的物理含义和应用 [J]. *应用气象学报*, 19 (3): 372–379. Xu huanbin, Tian Liqing. 2008. Physical meanings of “caved channel” in strong convective storm with its application [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 19 (3): 372–379.
- 翟国庆, 俞樟孝. 1992. 强对流天气发生前期地面风场特征 [J]. *大气科学*, 16 (5): 522–529. Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao. 1992. The surface characteristics of wind field prior to the occurrence of severe convection weather [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 16 (5): 522–529.
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (6): 713–727. Zhao Sixiong, Zhang Lisheng, Sun Jianhua. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems causing severe flood in Huaihe River basin during the summer of 2007 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (6): 713–727.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. 2012. Organizational modes of mesoscale convective systems over Central East China [J]. *Wea. Forecasting*, in press.