

对流温度含义阐释及部分示意图隐含悖论成因分析与预报应用^{*1}

李耀东¹ 刘健文¹ 吴洪星^{1,2} 史小康¹

LI Yaodong¹ LIU Jianwen¹ WU Hongxing^{1,2} SHI Xiaokang¹

1. 北京航空气象研究所,北京,100085

2. 解放军 93173 部队,瓦房店,116300

1. *Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China*

2. *No. 93173 Troops of PLA, Wafangdian 116300, China*

2013-08-27 收稿,2013-11-15 改回.

李耀东,刘健文,吴洪星,史小康. 2014. 对流温度含义阐释及部分示意图隐含悖论成因分析与预报应用. 气象学报, 72(3): 628-637

Li Yaodong, Liu Jianwen, Wu Hongxing, Shi Xiaokang. 2014. Analysis of the implicit mistakes in the several schematic diagrams for the implication of convective temperature with its application to forecasting. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(3): 628-637

Abstract The convective temperature is commonly used to the analysis and prediction of local convection, while the convective condensation level (CCL) is often used to estimate the base height of local convective cloud. There is certain precondition when the convective temperature and CCL are utilized to analyze local convection, and its inherent physical meaning is abundant. In this paper, thermodynamic diagrams of the convective temperature in the several classical books are analyzed, and some implicit mistakes are pointed out, which includes violating elementary knowledge of the atmospheric stability, opposing to theory of atmospheric energy, and conflicting with its inherent meaning. It is further pointed out that not being strict, and not knowing the inherent meaning of convective temperature thoroughly are the main factors in the process of making convective temperature diagram which cause these mistakes. A new diagram of convective temperature is constructed in this paper, with clearly physical meaning and more correspondingly to the basic meteorological theory. Observation data is employed to analyze the basic characteristics of convective clouds in summer Beijing, including occurrence numbers of convective clouds and occurrence time. Attempt is made to predict both the genesis and base height of convective cloud by using the convective temperature and CCL respectively. The results show that there exists some indicative significance of convective temperature as to local convection, and CCL can reflect the cloud base height of convective cloud to certain extent. The critical success index (CSI) reaches 45% when the difference between the maximum temperature and the convective temperature no more than 1°C is assigned to be the judgment of local convection development.

Key words Convective temperature, Convective condensation level, Thermodynamic diagram, Implicit mistakes, Local convection

摘要 分析和预报局地对流时常用到对流温度,对流凝结高度常被用于估计局地对流云的云底高度。对流温度和对流凝结高度用于局地对流分析时存在一定的前提,且其蕴含的物理意义非常丰富。论文剖析了几本较为经典的气象专业书籍中对流温度概念图示,指出其中隐含的悖论,包括与大气稳定度基本常识相悖、违反大气能量学理论、以及与物理量本身含义明显抵触。进一步阐释构图不够严谨、对对流温度含义理解不完全到位是出现这种悖论的根本原因。并构造了物理意义清晰、气象基本理论更为合理的对流温度示意图。利用观测资料,分析了北京夏季对流云的发生频数和生成时间,尝试用对流温度

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41175046,41205009)。

作者简介:李耀东,主要从事中尺度天气诊断分析及航空天气预报技术研究工作。E-mail: lyd@mail.iap.ac.cn

预报局地对流云的生成,用对流凝结高度预报局地对流云云底高度。结果表明,对流温度在局地对流云的预报中具有一定的指示意义,对流凝结高度能在一定程度上反映出局地对流云的云底高度。如果将最高温度不低于对流温度 1°C 作为判定能否产生对流云的一个标准,临界成功指数达到45%。

关键词 对流温度,对流凝结高度,示意图,隐含悖论,局地对流

中图法分类号 P456

1 引言

对流的产生一般需要3个基本条件:一定的水汽、不稳定层结、触发条件(Sherwood,2000)。对流云生成是强对流发展的基础。按触发机制不同,对流云一般可分为动力触发对流云和热力触发对流云两种。动力触发对流云的触发机制主要有气旋、锋面、槽脊等天气系统的移动以及地形抬升等,一般强度大,生命史长,天气系统表现相对明显,可以综合利用雷达、探空、天气图等手段较准确地进行预报。而热力触发对流云多属于局地对流云,其触发机制主要是辐射升温。

对流系统有明显的日变化,中国高原地区对流云的日变化最为明显(Li, et al,2008;张鸿发等,2003;江吉喜等,2002;钱正安等,1979;Hu, et al,2010)。而在内陆其他地区,对流系统一般也有较为明显的日变化(郑永光等,2008;陈炯等,2013)。随着昼夜辐射变化,大气低层温度升降,局地热力对流云的发展和演变有着明显的日变化特征。内陆,一般9—10时(北京时,下同)开始出现局地对流云,以后逐渐增多,发展旺盛,15—16时达到最强,入夜后逐渐消散。

受动力影响较大的系统性对流性天气预报相对来说成功率较高,而热力触发的对流云预报起来则相对困难。在实际业务中,热力触发对流云的预报一般从以下几个方面着手(陈中一等,2004):一是分析天气形势,热力触发对流云一般出现在均压场或弱气压场中,以及有利于气流辐合的区域;二是分析天气实况,当在同一天气形势下,邻近测站已有少量对流云出现或正处于发展中,本站未来也很有可能对流生成和发展;三是分析探空记录,从中寻找与对流是否能够发展的信息(李耀东等,2004)。

利用探空资料分析预报局地对流时,着重分析中低层大气稳定度及其变化,估计白天升温的作用,如果预计地面升温使得不稳定达到某种程度(通常

是判断地面最高气温是否能达到或接近对流温度),就预报有可能出现对流云。对于预报员来说,探空分析是夏季预报对流天气不可缺少的和最为常用的手段。对流温度是探空分析中一个十分有代表性的物理量,其隐含着考虑了辐射日变化对对流生成的影响。李耀东曾多次应邀为中国气象局预报员高级研修班学员讲授对流参数的应用,发现在应用部分经典图解解析对流温度时总是非常别扭,而研修班中来自各地的很多骨干预报员对对流温度的理解和应用也并不到位。近期,对部分专业书籍中对流温度概念图进行了认真地分析和细致地剖析,发现其中部分图示隐含着较为严重的悖论,本研究对此进行了分析和总结,并构造了新的对流温度示意图。论文利用实际资料对对流温度的应用进行了初步研究,旨在更为准确地把握对流温度,拓展这一物理量在局地对流天气分析预报中的应用。

2 对流温度含义阐释及示意图隐含悖论成因分析

2.1 对流温度经典示意图及应用基础分析

《气象学词典》(朱炳海等,1985)上对对流凝结高度(H_c)和对流温度都给出了明确的定义,并附有相应的图示。根据定义,对流凝结高度为由地面增温产生能量使气块绝热上升达到可能出现对流凝结物的高度,对流温度定义为地面加热到刚能开始发展热对流时的一个临界温度。许多大气物理和天气分析预报相关专业书籍均有对流温度和对流凝结高度的图示和解释,图1是引自《天气分析预报物理量计算基础》(刘健文等,2005)和《大气科学辞典》(《大气科学辞典》编委会,1994)上对流凝结高度和对流温度示意图。图1中CA为等饱和比湿线,SA₁(实曲线)为层结曲线,层结曲线与地面比湿值(露点)所对应的等饱和比湿线相交点C对应的高度即为对流凝结高度,由C点沿干绝热线下降与地面气压值交点A₂对应的温度 T_{A_2} 称为对流温度。

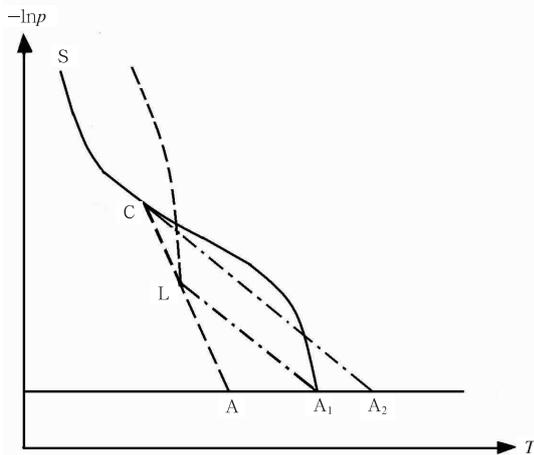


图1 经典的对流凝结高度和对流温度示意图
(引自《大气科学辞典》及《天气分析预报物理量计算基础》)

Fig. 1 Classical diagram of the convective condensation level and the convective temperature (cited from "Dictionary of atmospheric science" and "Basis for calculating of physical parameters associated with synoptic analysis and weather forecasting", see the references below)

经典专业书籍给出了对流凝结高度和对流温度明确的定义及求算方法,多年来,在实际业务和研究工作中得到了较好的应用。在中国实际业务中,应用对流温度预报局地对流时,常根据 08 时的探空,应用 T - $\ln p$ 图解法求得对流温度,然后与当天下午预估可能出现的最高气温做比较,如果最高气温接近或高于对流温度,就预报会产生局地对流。从图 1 中还可以很直观地看出,求算出的对流温度与地面露点对应的等饱和比湿线及大气中低层温度层结曲线有关。

利用对流温度进行局地对流预报时隐含的前提是在考虑地面气温受辐射升温影响的同时,近地面露点随时间不变或者变化很小,这是对流温度应用的重要前提。实际上,如果不考虑受系统性天气过程影响,近地面露点在一天内日变化不大。吴洪星(2011)对北京地区夏季气温和露点日变化进行了较为系统的研究,结果表明,相对于地面气温有明显规律性的日变化,露点日变化并不明显。赵玉春等(2012)对 2010 年长江中游夏季降水日变化的特征分析表明,相对于 9°C 的地面气温平均日变化,露点的日变化不到 1°C 。在利用探空分析时,环境温度在近地面层由于受太阳辐射影响日变化很大,而非

近地面的自由大气温层结日变化很小,因此,地面比湿值对应的等饱和比湿线与层结曲线的交点——对流凝结高度的日变化也很小,这样才使得利用 08 时探空计算得到的对流温度预报局地热力性对流具有较为坚实的基础。如果局地温度受天气过程影响变化大,温度层结及地面露点有明显的变化,对流温度就不再适用于作局地对流天气分析预报。

2.2 经典示意图中隐含的悖论分析

图 1 中给出了求算对流凝结高度和对流温度明确的图解方法,据此方法可以求得对流凝结高度和对流温度。但进一步分析会发现图 1 中隐含有较明显的悖论。为了对图 1 隐含的悖论进行进一步解析,对图 1 增加辅助线形成图 2。

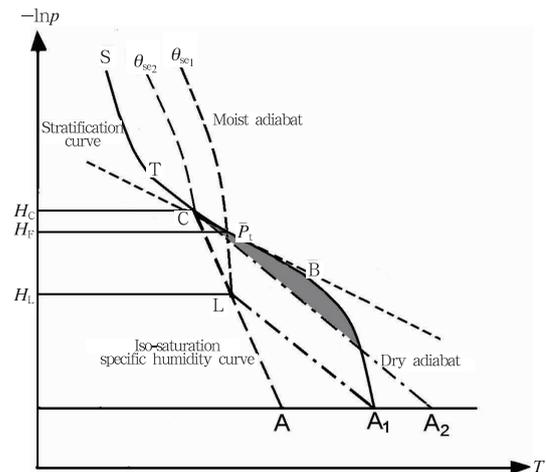


图2 经典对流凝结高度和对流温度示意图再解析
(H_L 为抬升凝结高度, H_F 为自由对流高度, H_C 为对流凝结高度)

Fig. 2 Re-analysis of the classical diagram of convective condensation level and convective temperature (H_L : lifting condensation level, H_F : free convective level, and H_C : convective condensation level)

图 2 中存在的悖论主要有 3 个方面。

悖论 1: 在自由大气中出现超绝热层结, 不符合大气稳定度基本常识。

从图 2 中可以看出, 层结曲线 SA_1 中 BT 段的温度递减率明显超过了干绝热递减率, 其中 P_i 点处温度递减率(图中经过 P_i 处的虚线)也明显大于干绝热温度递减率, 而此现象不是出现在边界层低层。自由大气中扰动调整普遍存在, 非边界层低层的自由大气中, 环境空气的温度递减率通常不会大于干绝热温度递减率。图中这一现象不符合大气稳定度

基本常识。

悖论 2:地面气块温度升高,假相当位温反而减小,违背大气热力学基本理论。

在图 2 中,当地面温度为 T_{A_1} 时,气块上升到抬升凝结高度 H_L 后,沿湿绝热线上升,对应的假相当位温为 θ_{se_1} ;对应于同一等饱和比湿线,即在露点不变的情况下,当地面温度升高到 T_{A_2} 时,抬升凝结高度与对流凝结高度重合于 C,气块沿湿绝热线上升,对应的假相当位温为 θ_{se_2} 。从图 2 可以看出 $\theta_{se_2} < \theta_{se_1}$,由假相当位温的定义式(Bolton, 1980)及假相当位温代表气块能量的物理本质可知,在水汽含量一定的情况下,代表气块能量的假相当位温应该是随温度的升高而增大,故图 2 中隐含的 $\theta_{se_2} < \theta_{se_1}$ 显然是与之相悖的,这也与大气能量学的基本理论相悖。

悖论 3:热对流发生时还存在对流抑制能量,与物理量自身的物理意义相悖。

依据图 2,当地面气温上升到对流温度 T_{A_2} 时,气块从地面沿干绝热线上升,在达到对流凝结高度(同时也是此状态下气块的抬升凝结高度)之前,气块明显需要克服一定的对流抑制(李耀东等,1998),即图 2 中填色区域代表的能量,然后才到达自由对流高度。图 2 体现出的这一含意与对流温度所表达的概念完全抵触。所谓对流温度,就是当地面气块达到此温度状态后,垂直上升过程不再有系统性热力抑制,气块始终受正浮力作用,对流可以自由发展时所具有的温度。若再有明显的负浮力抑制,那么对流温度就失去了其本质含义,再用此物理量来预报局地对流发展就存在理论缺陷。故此图中出现代表对流抑制的填色区域是一较为严重的错误,这一错误有可能使很多初学者以及很多仅有粗浅功底的气象人员对此物理量的概念产生模糊,无法清晰理解这一参数的实质,从而对如何应用这一物理量缺少信心。

2.3 修正的对流温度示意图

鉴于对图 2 的分析,本研究在参考《大气物理学》(盛裴轩等,2003)中“预测热雷雨”图示的基础上,对对流温度和对流凝结高度示意图进行了重新构造,图 3 是修正后的对流凝结高度和对流温度示意图,图中填色区可视为与探空对应的初始状态的对流抑制能量。

修正后的对流凝结高度和对流温度示意图消除了以上所述的 3 方面悖论,能更好地表示出对流凝

结高度的意义。对应初始状态:地面温度为 T_0 ,露点为 T_d ,抬升凝结高度为 H_L ,对流凝结高度为 H_C ,自由对流高度为 H_F ,三者的关系是 $H_L < H_C < H_F$ 。

在初始状态下,温度为 T_0 ,比湿为 q_0 的气块先沿干绝热线上升至 L 点(H_L 高度),再沿湿绝热线 θ_{se_1} 上升,湿绝热线 θ_{se_1} 代表的是气块初始的能量状态。如若地面气块受地面辐射作用升温,贴近地面的气层温度递减率将加大。如果地面气块温度达到对流温度 T_{cv} ,露点(水汽含量)不变,则地面气块干绝热抬升到此时的抬升凝结高度(刚好也是此状态下的对流凝结高度)处开始凝结。从大气基本稳定度常识可知,在通常状况下,大气层结的温度递减率是小于干绝热温度递减率的,这样的结果是:地面气块受辐射加热达到对流温度,则地面气块干绝热自由上升到对流凝结高度这一过程中,气块温度应该总是高于层结温度,即气块始终受正浮力作用;而在对流凝结高度上,由于气块湿绝热递减率一般小于层结温度递减率(仅限于水汽含量较大的湿对流过程分析),故气块仍然受正浮力作用。换言之,近地面气温如果达到对流温度,利用通常探空分析中可以得出,从地面抬升的气块在抬升过程中,在中低层将没有任何热力抑制作用,对流将自由发展。这也正解释了对流温度定义的由来。

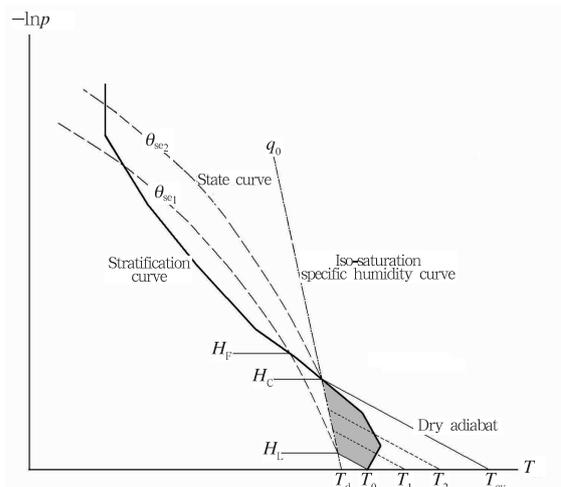


图 3 修正后的对流凝结高度和对流温度示意图

(H_L 为抬升凝结高度, H_F 为自由对流高度, H_C 为对流凝结高度)

Fig. 3 Modified diagram of the convective condensation level and the convective temperature (H_L : lifting condensation level, H_F : free convective level, and H_C : convective condensation level)

从图3还可以看出,当地面温度上升到 T_{cv} 时,在露点不变的情况下,等饱和比湿线 q_0 与经过 T_{cv} 的干绝热线相交于C点(饱和凝结),标志着地面空气能自由上升到C点凝结,并继续沿湿绝热线 θ_{sc_2} 上升, θ_{sc_2} 代表的是地面气块升温至对流温度后的能量状态, $\theta_{sc_2} > \theta_{sc_1}$, 即露点不变的情况下,气块升温对应的假相当位温也大,从而克服了2.2节中的悖论2,图3还避免了2.2节分析中的悖论1和3。

2.4 对流温度含义再阐释

图3中, T_1 和 T_2 可视为地面气块从初始状态 T_0 升温至对流温度 T_{cv} 两个中间状态,从图中还可以判断出,在比湿不变的情况下,随着地面气温逐渐升高,抬升凝结高度逐渐升高,对流抑制能量逐渐变小,隐含的自由对流高度逐渐降低。当且仅当地面气温上升并且至少要升高到对流温度时,对流抑制才彻底消失,气块完全受正浮力做功,此时地面气块的起始高度就是自由对流高度,地面气块扰动产生对流云,对流凝结高度即为热力对流云的云底高度。这也正是对流凝结高度能预报局地对流云云底高度的真正原因。图3也更加直观地阐释了《气象学词典》(朱炳海等,1985)中对流凝结高度和对流温度的定义的来源和物理意义。由此,对流温度也可解释为在对流天气分析中,确保地面气块升温至在干绝热抬升和抬升凝结初期始终不受环境层结抑制,而使得对流能够自由发展时所具有的最低温度。

2.5 部分其他专业书籍中对流温度示意图隐含的悖论分析

从以上分析可以看出,对流凝结高度和对流温度是物理意义非常丰富的物理量,其图示理应把其中的内涵准确全面地反映出来。遗憾的是,除以上分析的经典气象学著作隐含以上悖论外,在其他一些影响力较大的气象学专业基础书籍上,这类隐含的悖论也或多或少存在。

图4是《天气学原理和预报》(陈中一等,2004)上应用的热力图解,如果按照前面的分析,该图中也隐含2.2节所表述的悖论1和悖论3,即悖论1所述的在准自由大气中明显存在温度递减率大于干绝热递减率的现象,以及悖论3描述的地面气温升至对流温度后上升过程中仍然有抑制能量存在。此外,从该图中看不出地面温度明显升高后,代表气块能量的假相当位温比初始状态也升高。

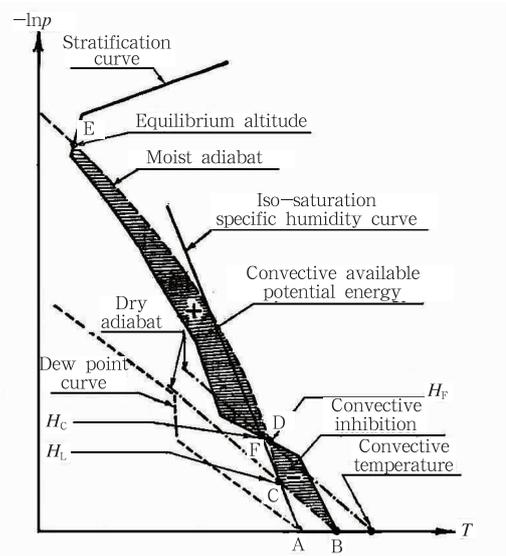


图4 《天气学原理和预报》(陈中一等,2004)热力图解
Fig.4 Thermodynamic diagram in "Synoptic theory and weather forecast"

图5为引自《天气分析和预报》(北京大学地球物理系气象教研室,1976)的对流凝结高度示意图,该图避免了2.2节所述的悖论1和悖论3,从总体上看似乎准确,且对理解对流温度也有帮助。但事实上,该图也明显隐含着2.2节中所指出的悖论2(在露点一定的情况下,假相当位温 θ_{sc} 应该是随温度的升高而增大,而不是降低)。根据此图得出抬升凝结高度为 H_L 、对流凝结高度为 H_C 、自由对流高度为 H_F ,三者之间的关系是 $H_L < H_F < H_C$,这与在2.3节分析所得出的三者之间的正确关系是 $H_L < H_C < H_F$ 相悖。鉴于以上分析,图5也隐含悖论。

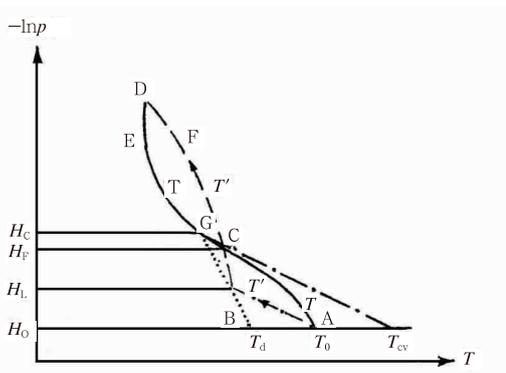


图5 《天气分析和预报》(北京大学地球物理系气象教研室,1976)图解
Fig.5 Thermodynamic diagram in "Synoptic analysis and weather forecast"

2.6 多类经典书籍中对流温度示意图隐含悖论原因分析

对流凝结高度和对流温度是两个常用物理量,大量经典的气象学教材和专业书籍有关的示意图或多或少隐含着悖论。总结分析,导致出现隐含悖论的原因主要为以下两个方面。

原因 1:对物理量意义理解不完全到位。

图 1、4 中出现了气温升至对流温度后,气块上升过程中仍然有对流抑制现象存在属于此类情况。此类情况与对流温度本身的物理意义相悖,也不符合《气象学词典》(朱炳海等,1985)的基本定义,有可能会影响到初学者对此物理量概念的准确理解。

原因 2:考虑不够细致,构图不严谨。

图 1、4 中绘制出的大气层结曲线中,出现的温度层结递减率大于干绝热递减率的情况属于构图不严谨。同样,图 1、5 中,出现假相当位温线斜率大于等饱和比湿线斜率也可归属于构图时考虑不够细致。后面这一种情况直接导致了与其相关的示意图中均隐含着 2.2 节中的悖论 2,即气块温度升高后假相当位温(能量)降低,从而与大气热力学基本理论相悖,并且也直接导致了示意图中对流凝结高度比自由对流高度高的悖论。

$T-\ln p$ 热力图解中的实际规律是“干绝热线斜率最小、湿绝热线(绿色虚线)斜率次之、等饱和比湿线(图中绿色实线)斜率最大”(图 11)。如果准确把握埃玛图中各种线条的特性和物理实质,绘制出的热力图解和对流温度示意图不会存在 2.2 节所分析的各类悖论。在实际工作中,要所有业务人员时刻

牢记埃玛图中各种线条的物理意义也是比较困难的,故在经典的专业书籍中,概念图示是很重要的。本研究所述的经典对流温度示意图中隐含有悖气象学基本理论的瑕疵,可能导致很多初学者对理解对流温度的来源和蕴含的真实物理意义存在疑虑,从而影响到对该物理量的应用尝试及拓展。

3 对流温度在北京地区局地对流云特征分析及预报中的初步应用研究

3.1 资料介绍及处理

本研究采用北京近郊地区南苑机场 1995—2007 年夏季 6—8 月的地面观测资料对对流温度与对流云特征进行分析。资料中包括每日逐时观测的总云量、天气现象、气温、露点、相对湿度、海平面气压、各层云的云量、云状、云底高度等,以及重要天气现象的天气纪要。资料主要用来分析北京夏季的对流云特征。探空为北京 54511 站(北京观象台)每天两个时次的观测,要素包括标准层和特性层的气压、位势高度、温度、露点、风向、风速。

3.2 北京夏季对流云特征分析

3.2.1 对流云出现频数

对流云典型特征是积状云,包括各种淡积云、浓积云、积雨云、层积云、高积云、卷积云等,本研究规定,机场实际观测记录中 4 个或以上一种或多种积状云出现时,定义为出现对流云;每天 24 个正点观测记录中,有 1 个或 1 个以上时次出现对流云,视为该天为对流云出现日。

表 1 北京夏季 1995—2007 年对流云出现日数统计

Table 1 Statistics of the convective cloud days in summer Beijing during 1995—2007

月份	出现对流云日数(d)	对流云日数占总日数的百分比(%)	浓积云日数(d)	浓积云日数占对流云日数的百分比(%)
6月	153	39.2	47	30.7
7月	194	48.1	67	34.5
8月	222	55.1	90	40.5

北京 1995—2007 年夏季 6—8 月出现对流云总体情况(表 1)显示,这段时间出现对流云的日数为 569 d,占总日数的 48%,其中浓积云发生 204 d,占对流云总日数的 36%,可见北京夏季的对流云发生频繁,发展比较旺盛。此外,从各月的分布来看,6 月对流云出现相对较少,7 月次之,8 月最多,超过了当月总日数的一半,8 月出现的对流云强度也相对较强,浓积云日数占到当月对流云总数的 41%。

3.2.2 对流云生成时间

日变化是北京地区对流天气的一个重要特征(秦丽等,2006)。从北京地区 1995—2007 年夏季对流通生成时间的统计特征(图 6)可以看出,对流云生成时间具有明显的日变化特征。对流云开始生成峰值时间位于 13 时,20 时至次日 04 时很少生成对流云,09—18 时为对流云生成比较频繁的时段,共生成对流云 503 次,占到对流云总日数的 88%。而浓

积云生成主要集中在 11—18 时。浓积云生成的峰值时间比对流云平均约滞后 1 h, 其中 11—18 时是对流发展比较旺盛的时段。这主要可能因为浓积云生成需要克服较强的对流抑制能量, 并需要地面气块受辐射影响获取较高的升温 and 能量。

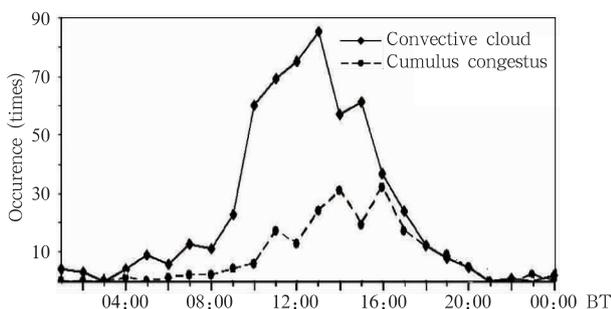


图 6 北京 1995—2007 年夏季对流云和浓积云生成时间分布

Fig. 6 Temporal variation of the occurrence rate for convective clouds and cumulus congestus in summer Beijing during 1995 - 2007

3.3 局地对流云特征分析

从以上对流云生成时间的分布来看, 北京夏季的对流云生成多发生在 09—18 时。局地对流云是对流云中的一种, 为了从中遴选局地对流, 本研究采用以下规定:

- (1) 05—08 时各时次的总云量均不大于 1;
- (2) 09—18 时对流云总云量至少有一个时次在 4 个量(含)以上;
- (3) 09—18 时无对流云产生。

凡是满足(1)、(2)两个条件的即定义为一个局地对流云日, 满足(1)、(3)两个条件的定义为一个无局地对流云日, 其他情况视为不能确定是否发生了局地对流。据统计, 1995—2007 年夏季北京地区局地对流云日总共有 50 个, 出现概率约为 4.2%; 无局地对流云日共有 111 个。本研究将针对这 50 个属于局地对流个例进行统计分析, 从宏观上研究北京夏季局地对流云的特征。

3.3.1 温度、露点的日变化

北京夏季局地对流日平均气温和露点的日变化(图 7)显示, 气温具有明显的日变化特征, 平均最大值与平均最小值相差 10.6℃。而露点的日变化不明显, 最大值与最小值仅相差 1.9℃, 这也间接反映了近地面层水汽饱和程度的日变化特征。

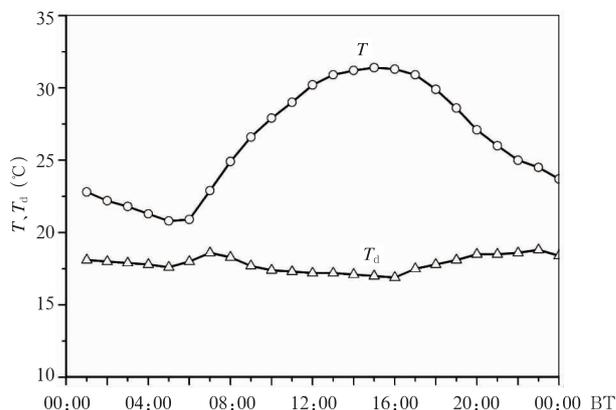


图 7 北京夏季局地对流日平均气温、露点的日变化
Fig. 7 Mean diurnal variation of temperature and dew point temperature in summer Beijing during the local convection occurring days

3.3.2 气温、露点时段较差及对流温度分析

气温日较差通常是指一日之内最高气温和最低气温的差值, 反映了气温的日变化特征。为了研究局地对流发生前地面的气温和露点的变化, 将气温的时段较差定义为 08 时至白天温度为最高时这个时段内的最高气温和最低气温的差值, 而这个时间段内露点的最大值与最小值之差则定义为露点的时段较差。

50 个局地对流云日的气温、露点时段较差以及对流温度与最高温度之差的累积概率分布(图 8)表

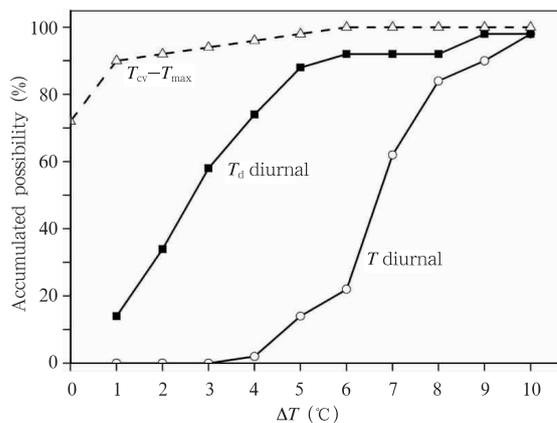


图 8 局地对流云日气温、露点时段较差及对流温度与最高温度之差累积概率分布
Fig. 8 Accumulated possibility for the diurnal inequality of temperature and dew point temperature, as well as the difference between the convective temperature and the maximum temperature, for the convective cloud occurring days

明,局地对流云日的气温变化幅度比较大,时段较差在 4°C 以内的个例只有1个,占总数的2%。与之相比,露点的时段变化幅度比较小,多达74%的个例露点时段较差在 4°C 以内。这直接说明辐射升温对局地对流云形成的决定性作用。

从图8中对流温度与最高气温差的累计概率分布线还可以看出,发生局地对流时,当天的最高气温超过对流温度的个例占总日数72%(图中横坐标对应0),最高气温与对流温度之差小于 1°C 累计概率为88%,即有44个个例,而高达96%的个例最高气温与对流温度之差在 4°C 以内。这充分说明当地面气温与对流温度很接近时,低层不稳定性增高,会促生对流。由此可见,对流温度对预报局地对流云发展具有很明显的指示意义。本研究还表明,当把最高气温与对流温度之差不小于 1°C 作为预报北京局地对流的阈值时,临界成功指数达到最大值(0.45),即预报准确率最高。本研究分析表明局地对流在北京属小概率事件,而相应于小概率事件,临界成功指数为0.45是可以被接受的(周后福等,2009)。因此,可以将最高气温不低于对流温度 1°C 作为判定北京局地对流是否产生的一个预报判据。

3.3.3 对流凝结高度与实测云底高度对比分析

依照对流凝结高度的含义,对流凝结高度可以反映局地热对流的云底高度。在本研究分析的50个局地对流云日中,当天最高气温与对流温度之差不小于 1°C 的有44d。对这44d中对流云最初出现时云底高与对流凝结高度之差进行了对比分析,图9为二者高度差的累积概率密度分布,可见对流凝结高度与实测对流云云底高之差在1000m以内的

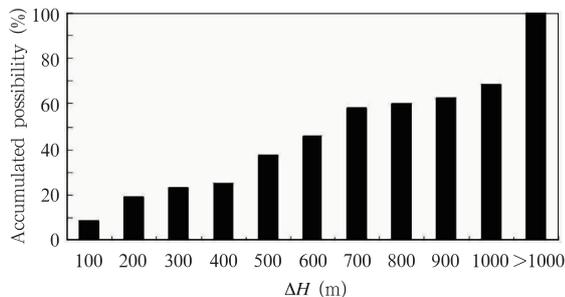


图9 对流云日对流凝结高度与对流云云底高之差概率分布

Fig. 9 Accumulated possibility distribution of the difference between CCL and the convective cloud base height in the convective cloud days

达到了70%,600m以内的也达到了46%。由此可知,对流凝结高度在很多情况下与真正的对流云底高度相差不大,即对流凝结高度能在一定程度上反映出对流云的云底高。

3.4 局地对流个例分析中对流温度和对流凝结高度的分析应用

选取1999年8月23日北京南苑机场局地对流云的发展过程分析对流温度和对流凝结高度的应用。当天天气处于弱系统控制时,形势没有大的改变。实测的气温日变化(图10)显示,05时出现当天最低气温 19.6°C ,15时出现最高气温 29.4°C ,气温的日较差达到 9.8°C 。08时探空资料的地面气温为 21.7°C ,露点为 17.8°C ,据探空资料计算得出的对流温度为 27.7°C (图11)。根据当天机场实况记录,12—18时南苑机场出现了对流云发展和消散过程。实况观测表明,12时地面气温为 27.1°C ,与08时探空计算的对流温度相差 0.6°C ,12时开始产生对流,观测到5个量淡积云,云底高为1200m。观测到的地面气温继续升高,15时达到最高(29.4°C),对流继续发展,16时对流发展到最盛,产生8个量的浓积云。此后,地面气温开始下降,到18时地面气温为 26.3°C ,对流云开展减弱消失。

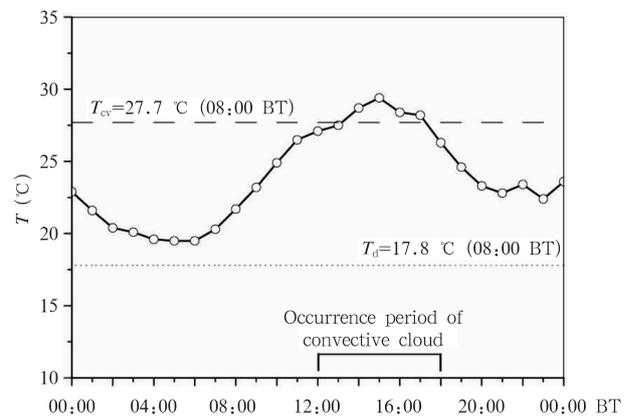


图10 1998年8月23日实测地面气温日变化
Fig. 10 Diurnal variation of the observed surface temperature on August 23, 1998

图11为按照基本热力学规律,制作的与本个例资料对应的标准的对流温度热力图解,与本个例对应,计算出抬升凝结温度为 17.0°C ,抬升凝结高度处气压为958.5 hPa,对应的 H_L 为467 m;对流凝结高度处凝结温度为 15.7°C ,对应的气压874.3 hPa,相应的 H_C 为1254 m,对流温度为 27.7°C ;08点

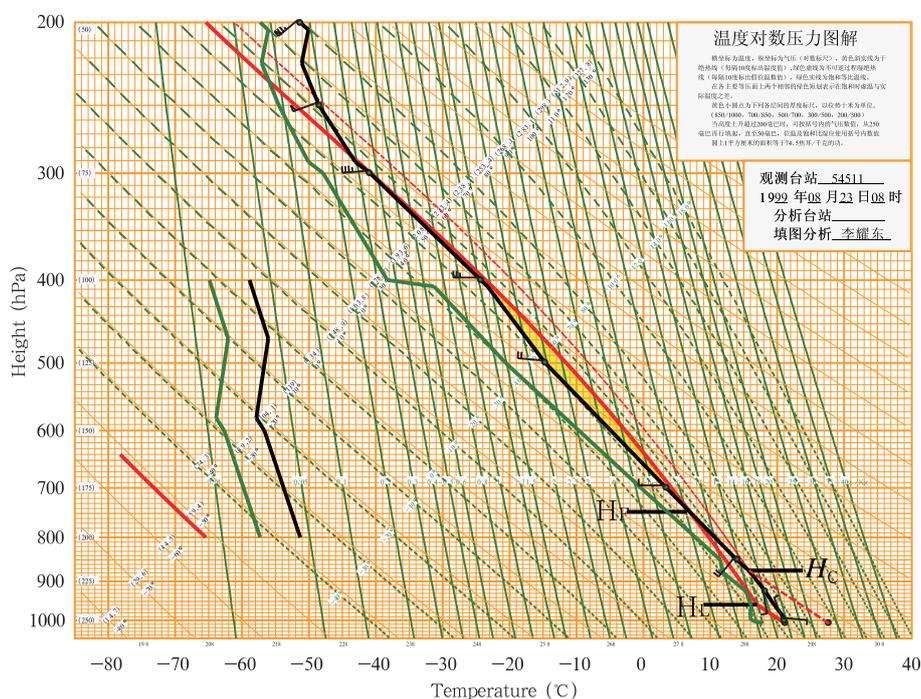


图 11 1999 年 8 月 23 日 08 时标准热力图解中的对流温度分析
Fig. 11 Diagram of the convective temperature in the standard thermodynamic diagram at 08:00 BT 23 August 1999

探空地面气块对应的自由对流高度处气压为 746.5 hPa, 相应的 H_F 为 2575 m。显然在本个例中, $H_L < H_C < H_F$, 与 2.3 节理论分析一致。值得特别说明的是, 对应于本个例, 计算所得的对流凝结高度为 1254 m, 与实际观测到的当日 12 时对流云开始出现时对流云云底高(1200 m)极为接近, 这从某种角度也反映出对流温度和对流凝结高度对当天局地热对流预报有很好的指示意义。

4 结论和讨论

(1) 部分经典对流温度示意图隐含悖论, 影响到对该物理量的理解, 需要进行修正。

对流温度和对流凝结高度是两个物理意义明确、内涵丰富的物理量, 结合地面气温预报可以用来预报局地对流。多种经典专业书籍中有关对流温度和对流凝结高度的概念图示, 或多或少存在构图不严谨、对物理量含义理解不到位因素, 直接导致了部分对流温度示意图或多或少隐含有违反大气稳定度常识、与对流温度本身含义相悖、违反大气能量学理论 3 方面的悖论, 并可能导致对此物理量理解时不十分准确。本研究构造的对流温度和对流凝结高

度概念图示, 改正了原来的错误, 使得此物理量意义更为明晰, 且符合大气热力学和大气能量学基本理论。

(2) 北京地区夏季对流较为活跃, 日变化明显, 对流温度对局地对流云预报具有一定指示意义。

以南苑机场为代表的北京地区, 1995—2007 年夏季 6—8 月出现对流云的日数占总日数的 48%, 其中浓积云日数占对流云总日数的 36%, 对流云发生频繁, 发展比较旺盛。8 月是对流发生频数最多、强度最盛的月份。对流云的生成主要集中在 09—18 时, 峰值位于 13 时, 具有明显的日变化特征, 而浓积云开始出现主要在 11—18 时, 峰值比对流云滞后 1 h 左右。对流温度和对流凝结高度对北京局地对流云的预报有较好的指示意义。如果把最高气温与对流温度之差不低于 1°C 作为判定能否产生局地对流云的一个标准, 南苑机场局地对流云预报成功指数达到 45%。当最高温度不低于对流温度 1°C 时, 对流凝结高度与对流云云底高之差在 600 m 以内的占局地对流云总日数的 46%。

(3) 有关对流温度的应用以及对流日变化的研究有待进一步发展。

对流具有明显的日变化,局地对流尤其如此。对流温度正是为了预测局地对流发展而提出的一个物理量,其蕴含考虑了对流的日变化要素。但是长期以来,有关这一内涵丰富的物理量相关的业务研究及应用并不太多。本研究针对北京的应用研究也只是非常初步的探讨,其中有关对流云生成时间及对流凝结高度与实测对流云云底高比较的结果分析是根据气象台站的天气实况记录进行统计的,实测对流云云底高度受多种因素影响也非绝对准确。此外,由于实际大气中各种扰动在所难免,本研究的局地对流云个例统计也未必能真正代表地面气块热对流实际状况。但从总体上来说,本研究的分析思路和得出的宏观结论应该是可接受的。

中国幅员辽阔,夏季各地对流日变化情况不尽相同,对流温度对当地局地对流发展的指示意义非常值得研究。埃玛图分析在中国夏季对流预报时应用非常普遍,但通常限于基本的条件稳定度判别以及对流有效位能计算。从本研究也可以从侧面看出,在理解的基础上灵活应用,可以使得包括对流温度和对流凝结高度在内的许多物理量应用更加深入。本研究从某种程度上说也是抛砖引玉,希望可以促进有关业务研究的进一步发展和相关参数更为广泛地拓展和应用。

致谢:感谢成都军区空军气象中心张杰教授在本文投稿前审阅时提出的修改建议。

参考文献

- 北京大学地球物理系气象教研室. 1976. 天气分析和预报. 北京: 科学出版社, 50-51
- 陈炯, 郑永光, 张小玲等. 2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析. 气象学报, 71(3): 367-382
- 陈中一, 费建芳, 高传智等. 2004. 天气学原理和预报. 北京: 中国人民解放军理工大学气象学院, 468pp
- 《大气科学辞典》编委会. 1994. 大气科学辞典. 北京: 气象出版社, 161pp
- 江吉喜, 范梅珠. 2002. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统. 大气科学, 26(2): 263-270
- 李耀东, 刘健文, 刘玉玲等. 1998. 埃玛图微机制作及对流有效位能的计算. 气象, 24(5): 23-27
- 李耀东, 刘健文, 高守亭. 2004. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究. 气象学报, 62(4): 401-409
- 刘健文, 郭虎, 李耀东等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础. 北京: 气象出版社, 253pp
- 钱正安, 张世敏, 单扶民. 1984. 1979年夏季青藏高原附近地区对流的分析//青藏高原气象科学试验文集. 北京: 科学出版社, 243-257
- 秦丽, 李耀东, 高守亭. 2006. 北京地区雷暴大风的天气-气候学特征研究. 气候与环境研究, 11(6): 754-762
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 2003. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 152-161
- 吴洪星. 2011. 北京地区夏季对流参数日变化的研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 100pp
- 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 2008. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. 科学通报, 53(4): 471-481
- 张鸿发, 郭三刚, 张义军等. 2003. 青藏高原强对流雷暴云分布特征. 高原气象, 22(6): 558-564
- 赵玉春, 徐明, 王叶红等. 2012. 2010年汛期长江中游对流降水日变化特征分析. 气象, 38(10): 1196-1206
- 周后福, 郑媛媛, 李耀东等. 2009. 强对流天气的诊断模拟及其预报应用. 北京: 气象出版社, 10-20
- 朱炳海, 王鹏飞, 束家鑫. 1985. 气象学词典. 上海: 上海辞书出版社, 318-320
- Bolton D. 1980. The computation of equivalent potential temperature. Mon Wea Rev, 108(7): 1046-1953
- Hu L, Song Y, Li Y D, et al. 2010. Diurnal variability of precipitation depth over the Tibetan Plateau and its surrounding regions. Adv Atmos Sci, 27(1): 115-122
- Li Y D, Wang Y, Yang S, et al. 2008. Characteristics of summer convective systems initiated over the Tibetan Plateau. Part I: origin, track, development and precipitation. J Appl Meteor Climatol, 47(10): 2679-2695
- Sherwood S C. 2000. On moist instability. Mon Wea Rev, 128: 4139-4142