

湿大气的广义位温与干大气位温及饱和湿大气相当位温的比较^{* 1}

周玉淑 朱科锋
ZHOU Yushu ZHU Kefeng

中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2008-07-02 收稿, 2008-09-27 改回.

Zhou Yushu, Zhu Kefeng. 2010. Comparisons between the generalized potential temperature in the moist atmosphere and the potential temperature in the dry atmosphere and the equivalent potential temperature in the saturated moist atmosphere. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(5):612-616

Abstract The real atmosphere is neither absolute dry nor saturated, it is moist but not saturated, and the generalized potential temperature (GPT) was thus introduced to describe this humid feature of the real moist atmosphere. Comparisons between the GPT in the moist atmosphere and the potential temperature (PT) in the dry atmosphere and the equivalent potential temperature (EPT) in the saturated moist atmosphere were done by analyzing three torrential rain cases occurred respectively over the Changjiang-Huaihe River Basins in 2003 and the north China in 2004 as well as during Typhoon Billis (2006) occurred in 2006. The results showed that the relative humidity is not up to 100% even in torrential rain and typhoon systems, and the saturated condition for defining the EPT is not met completely. The GPT can represent the PT for all of these three atmospheric statuses of dry air, unsaturated moist air and saturated moist atmosphere with the dry or saturated atmosphere being a special case of the GPT. When specific humidity is zero, the GPT becomes PT, and when the specific humidity is up to the saturated specific humidity, the GPT represents the EPT. In addition to linking the PT with the EPT, the GPT can describe the moist concentration and moist gradient better than the EPT. The GPT's definition included the process that the air changed from dry to moist, then up to saturated, and it can reflect a variety of processes of water vapor giving a better expression to the real moist atmosphere.

Key words Moist atmosphere, Potential temperature, Equivalent potential temperature, Generalized potential temperature

摘 要 实际大气既非完全是干空气, 也不是处处达到饱和的湿空气, 而是处于含有水汽但又不饱和的湿空气状态。基于这样一种湿大气状态, 在湿大气中广义位温定义的基础上, 对不同暴雨类型的广义位温与干大气的位温及饱和湿大气的相当位温做了比较。对 2003 年江淮流域暴雨过程、2004 年华北一次暴雨过程以及 2006 年碧利斯台风中的位温、相当位温和广义位温分布的对比分析表明: 即使是在暴雨系统中, 湿空气的相对湿度也不一定达到 100%, 饱和湿空气相当位温的引入条件不能完全满足。而广义位温的定义用一个表达式就可以表示出干大气、未饱和湿大气以及饱和湿大气这 3 种大气状态的位温, 位温和相当位温则是广义位温的特殊情况。当大气比湿为零时, 广义位温就变成位温; 当大气比湿达到饱和后, 广义位温就变成相当位温。除了可以衔接干大气位温和饱和湿大气的相当位温外, 广义位温包含了水汽由干到湿再到饱和的变化过程, 更好地体现了大气中水汽的实际分布和变化特征。

关键词 湿大气, 位温, 相当位温, 广义位温

中图法分类号 P40

* 资助课题: 国家重点基础研究发展计划(2009CB421505), 科技部公益性行业(气象)专项(GYHY200906004), 国家自然科学基金项目(40975034)和灾害天气国家重点实验室开放课题(2008LASW-A01)。

作者简介: 周玉淑, 主要从事中尺度动力诊断分析和数值模拟研究。zys@mail.iap.ac.cn

1 引言

位温(用 θ 表示)是干空气的一个重要的温度参量,它在干绝热过程中具有守恒性(Ertel, 1942),可用来比较不同气压下空气质块的热力差异。但是在伴有潜热释放的湿过程中, θ 不再守恒。因此,相当位温(用 θ_e 表示)被引入来对饱和湿大气进行研究, θ_e 在饱和湿绝热过程中是守恒的。由于 θ_e 在饱和湿绝热过程中的守恒性,它被应用到分析湿大气的多个研究领域。与温度(用 T 表示)相比,无论是干大气的位温还是饱和湿大气的相当位温,由于其守恒性,在大气动力和热力学研究领域都得到了广泛的应用。尽管如此,位温和相当位温都有各自的适应范围:位温适用于干大气,而相当位温适用于饱和湿大气。然而,实际大气既不会是处处干也不会处处达到饱和,是处于含有水汽,但又达不到完全饱和的这样一种湿空气状态,Gao等(2004)把大气中有饱和出现,但又不是处处饱和的状态称为非均匀饱和,并用于高温高湿天气的分析和识别(Gao, et al, 2005)。为了便于理解,与干大气和饱和湿大气相对照,本文把既非完全干也不是处处饱和的非均匀饱和大气称为湿大气,它是实际大气真实的一种状态,此时,位温和相当位温的适用性都受到了一定的限制。

相对于干大气和饱和湿大气来说,湿大气是研究大气动力学问题的最真实的基本对象,但是由于其涉及到水汽相变,微观物理过程比较复杂,难以观测,也不能准确计算,一直没有取得重要的研究进展。在动力学研究方面,20世纪70年代,谢义炳(1978)就倡导了要开展湿空气动力学的研究,之后,中国学者从不同角度做过这方面的研究(王两铭等, 1980; 吴国雄等, 1995)。但研究工作相对来说还很少。国外有过很多的湿空气动力学方面的研究,如:Tripoliet等(1981)检验了冰—水混合物的位温 θ_i 比位温在大气深对流系统识别方面有优势;Pointin(1984)强调了降水产生的热力影响,定义了湿相当位温 θ_i 替代模式计算中的位温;Hauf等(1987)从熵的角度出发,认为之前提出的多种形式的位温都可以用一个普适的熵温 θ_s 来表示;而Ooyama(1990)把虚温 T_p 引入热力过程后,在考虑冰相作用基础上,推导出一套直接且具有一致性的动力热力准则,与微物理过程参数化相联系;Bannon

(2002)也提出了一套湿空气动力学方程组,试图为将来实现完全摒弃物理过程参数化而仅仅从原始方程组的数值积分作短时乃至长期预报提供理论基础。这些工作都采用了大量的变量和经验系数,以便更准确地描述实际大气中干空气、水汽、水凝物或者液态水并存这一特性;但是,这样也导致了体现湿特征的新变量物理意义模糊,而且计算复杂,用到实际天气的个例分析中并不方便,所以研究成果没有得到普及。而广义位温的引入,可体现出实际大气总处于干与饱和之间的特性,也没有带来其他新的变量,易于计算,用到实际天气分析中有很大的优势。本文就是在此基础上对比不同暴雨过程中位温、相当位温和广义位温的分布形势,以体现广义位温的优势所在。

2 位温、相当位温和广义位温分布在暴雨过程中的对比

Gao等(2004)针对非均匀饱和大气提出的广义位温 θ^* 的定义式是: $\theta^* = \theta \exp\left(\frac{Lq_s \cdot (q/q_s)^k}{c_{pm}T}\right)$,其中, θ 是干大气的位温, q 和 q_s 分别是比湿和饱和比湿, L 和 c_{pm} 是单位质量的凝结潜热和湿空气的定压比热容, $(q/q_s)^k$ 是与湿度有关的权重函数(Gao等(2004)称为凝结几率函数),是反映实际大气湿度的因子。由广义位温的表达式可见:当比湿 q 为零,表示大气是完全的干大气,则有 $\theta^* = \theta$,广义位温退化为干大气位温;当空气达到饱和,即 $q = q_s$,则有 $\theta^* = \theta \exp\left(\frac{Lq_s}{c_{pm}T}\right) = \theta_e$,广义位温退化为饱和湿大气的相当位温;但是当比湿 q 介于0和 q_s 之间时, θ^* 既不是 θ ,也不是 θ_e ,而是介于两者之间,可以表示大气从干到湿,再到完全饱和这样一个变化过程,能更好地表示出实际湿大气中的水汽湿度变化,而位温和相当位温就成为广义位温的特例。可见,广义位温在干大气位温和饱和湿大气相当位温之间起到了连接作用,用一个公式就能表述出干大气、未饱和湿大气及饱和湿大气这3种大气状态的位温,能更真实地描述实际湿大气的状态。

2.1 在江淮暴雨中的分布

由于江淮流域的梅雨是中国比较典型而多见的暴雨过程,首先就以江淮流域的梅雨锋暴雨期间的位温、相当位温和广义位温分布为例加以比较。

2003年江淮流域发生了强暴雨致洪灾害,6月下旬末到7月上旬末,大范围的降水带主要集中在淮河流域(周玉淑等,2005)。由2003年6月下旬平均的位温、相当位温和广义位温在850 hPa上的分布(图略)可见,大陆上梅雨期的位温分布相对均匀,温度梯度不大,由于位温不能反映出水汽信息,所以从位温分布上分析不出梅雨锋这样一条水汽梯度的锋带。而一条明显的相当位温梯度大值带出现在 30° — 33°N ,能明显地反映出梅雨锋南北部之间明显的水汽梯度特征,但没有体现出梅雨锋以南的区域由于西南季风水汽输送导致这一区域的高湿特征。而在广义位温分布图上(图略), 33°N 以南的大范围区域,从孟加拉湾向西南延伸到日本岛附近,都是明显的广义位温及广义位温梯度的大值带,这主要是因为广义位温的定义式中包含了水汽比湿,只要有水汽,无论湿大气是否饱和,它的水汽含量特征都能通过广义位温体现出来。所以,就这个特点来说,广义位温确实存在明显的优越性。

从经向剖面图来看(图略),位温分布相对来说仍然比较平直,而相当位温在 33°N 附近有明显的梯度区,表明西南暖湿空气与北方南下干冷空气交汇在这个区域附近,形成了天气气候学上有名的梅雨锋。与相当位温不同,广义位温分布是在 30° — 33°N 的区域出现了明显的广义位温等值线密集区,有很大的广义位温梯度,表明这个区域的水汽含量很高。从对应的相对湿度分布可见(图略),广义位温梯度的高值区都是在相对湿度高于90%的区域,说明在广义位温表达式中引入水汽比湿后,确实更好地反映出了梅雨锋暴雨时期的暴雨区高水汽集中特征,这是相当位温没有体现的。而且,相对湿度的分布也表明即使是在很强的梅雨锋暴雨洪涝发生时,空气的相对湿度也不是完全达到100%,因此在湿大气中定义广义位温这样一个变量,能更真实地反映实际大气的水汽分布和热力性质。

2.2 在华北暴雨中的分布

由于中国的暴雨多发并且区域广泛,有必要对其他形式的暴雨类型也做对比分析。这里以2004年8月的一次华北暴雨为例做进一步的对比。2004年8月11—13日,在华北地区发生了一次大暴雨过程。在这次暴雨过程中,位温分布仍然是相对均匀的(图略),而相当位温就可以反映出暴雨发生时有一条明显的西南—东北走向的湿舌(图略),表明

有水汽向暴雨区输送,而且相当位温的梯度大值区主要与相对湿度梯度大值区对应。而广义位温除了这条湿舌仍然表现得很清楚,在暴雨区南北边界也体现出明显的水汽梯度以外,其中心大值区更是出现在相对湿度大于90%的区域(图略),中心区较相当位温反映出的中心区更显著,能表示出华北地区暴雨时期水汽充沛而且集中的特点。

过暴雨区的经向剖面可见,位温分布仍然是相对均匀和平缓的(图略),而相当位温从高层到中低层出现了明显的契型分布(图略),反映了暴雨区从低到高层都有水汽凝结潜热释放,在 38°N 以北的暴雨区南部的中低层,相当位温明显高于暴雨区北部 42°N 以北区域,暴雨区南部和北部的相当位温梯度与相对湿度梯度大值区一致。而广义位温等值线在暴雨区的高低层是连通的,反映出了暴雨区上空从低到高层都有大量水汽的特点,而且,广义位温的最大中心值与相对湿度的中心区也是对应的,其大值区是出现在相对湿度大于90%的区域,中心区较相当位温反映出的中心区更集中。对比相当位温和广义位温分布还能发现,相当位温在暴雨区以南(34° — 37°N)上空的分布,并没有反映出500 hPa以上的一个相对湿度低于20%的干区,相当位温等值线直接向北向低层延伸,而广义位温等值线在这个区域表现出先在干区南部向下,再向北出现一个广义位温脊,然后在暴雨区向下延伸的特点,在这个相对湿度只有20%的干区形成一个浅的广义位温槽,整个广义位温等值线的变化与水汽场的变化形势较为一致。

2.3 在碧利斯台风中的分布

台风暴雨也是中国暴雨的一大类。0604号台风碧利斯在整个发展过程中,结构松散,中心附近对流不强,没有明显的眼壁和台风眼结构,风力不是特别强,但含水量大,是2006年夏季南方洪涝灾害的主要影响系统。下面以碧利斯台风为例来分析它的位温、相当位温和广义位温分布。

从7月12日的850 hPa等压面图可见,碧利斯处于一个水汽非常充沛的环境中,其外围环流的相对湿度都在80%以上,中心则维持在90%以上,而由于不包含水汽信息,碧利斯中的位温虽然也有非对称的特点,但整体的位温分布相对还是均匀的(图

1a),位温梯度也不明显。从相当位温分布来看(图1b),其体现的碧利斯环流的热力非对称结构就比位温清楚,从碧利斯台风环流的东南部、东部到东北部都是明显的相当位温高值区,也是相当位温梯度的大值区,中心区则是相当位温相对小的干区(图1b)。而广义位温的分布(图1c)则表明:广义位温

也是在环流的南部、东部到东北部有最大值,但广义位温等值线显然比相当位温密集得多,表明广义位温梯度明显大于相当位温梯度,由广义位温分布表示出的碧利斯台风的热力非对称环流是最明显的,而且,广义位温的大值区与相对湿度在90%以上的区域基本是重合的,它除了能体现热力结构以外,在

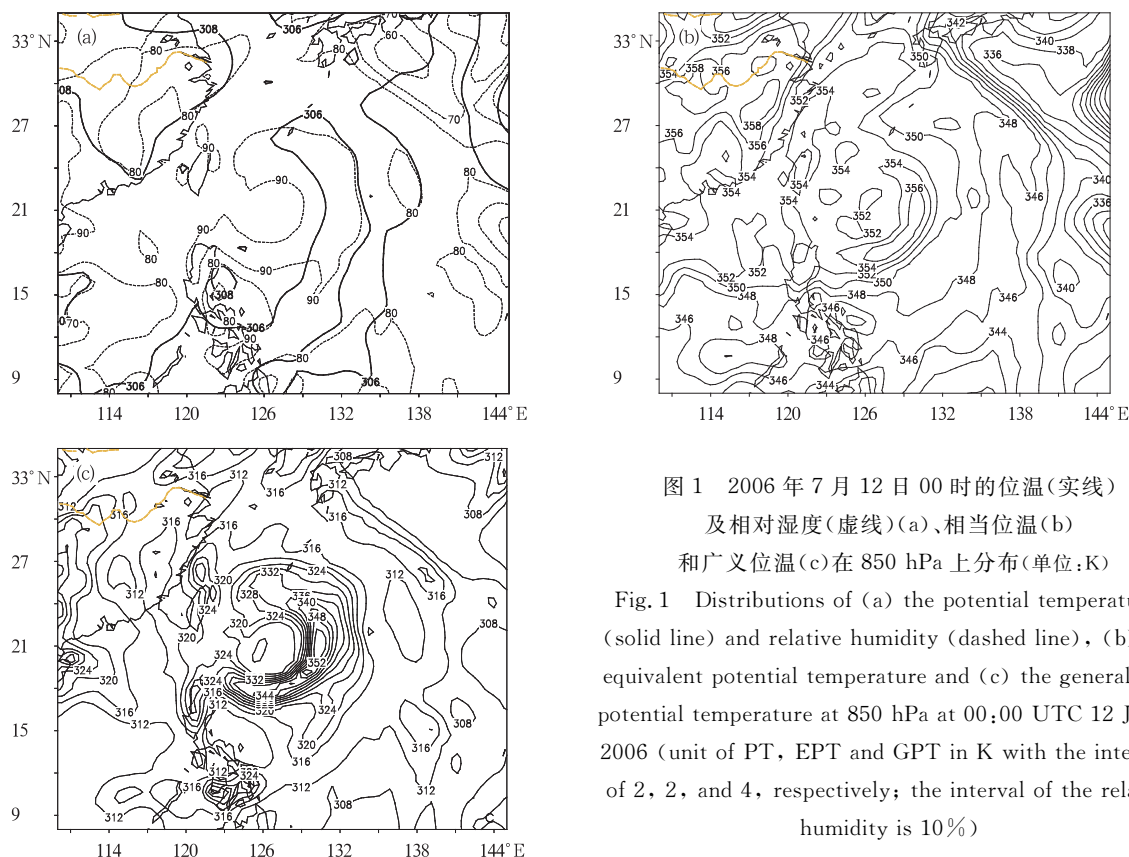


图1 2006年7月12日00时的位温(实线)及相对湿度(虚线)(a)、相当位温(b)和广义位温(c)在850 hPa上分布(单位:K)

Fig. 1 Distributions of (a) the potential temperature (solid line) and relative humidity (dashed line), (b) the equivalent potential temperature and (c) the generalized potential temperature at 850 hPa at 00:00 UTC 12 July, 2006 (unit of PT, EPT and GPT in K with the intervals of 2, 2, and 4, respectively; the interval of the relative humidity is 10%)

反映水汽场的分布形势方面优于相当位温。

从经向剖面图可见,碧利斯发展期间,低层大范围的环境水汽都非常充沛,相对湿度在850 hPa以下基本都保持在90%以上(图2a中虚线),在碧利斯的中心,500 hPa高度上甚至达到了100%,说明了碧利斯台风的含水量确实非常大。但是,即使是在水汽丰富,对流旺盛的碧利斯台风环流系统中,位温分布也是准水平的(图2a中实线),而陡直的相当位温等值线则出现在台风中心和台风眼壁附近,对流不稳定区域延伸到了600 hPa高度(图2b)。因为有饱和水汽信息,相当位温等值线在碧利斯台风的环流中变得较陡直,但是与同样陡直的广义位温等值线的分布相比(图2c),广义位温在低层也有明

显的不稳定区域,只是伸展高度低于相当位温,但相当位温的梯度明显小于广义位温梯度,而且广义位温的最大值是出现在水汽含量最大的台风眼壁附近,梯度明显是两条,尤其台风眼北侧的梯度带对应的相当位温梯度明显得多,这种经向剖面上的南北眼壁附近水汽多,而台风中心水汽少的分布显然更接近于实际的水汽分布情况。

从以上江淮梅雨锋暴雨、华北暴雨以及碧利斯台风系统中的位温、相当位温和广义位温的分布对比可以看到,各个区域的暴雨过程中的位温分布都是相对均匀的,位温梯度并不大。与相当位温相比,广义位温能更明显地体现出暴雨过程中水汽的集中和水汽梯度效应。

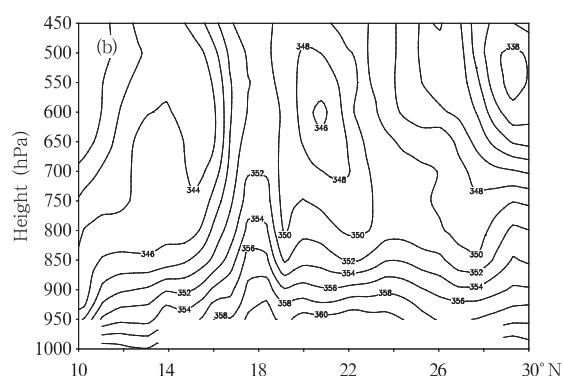
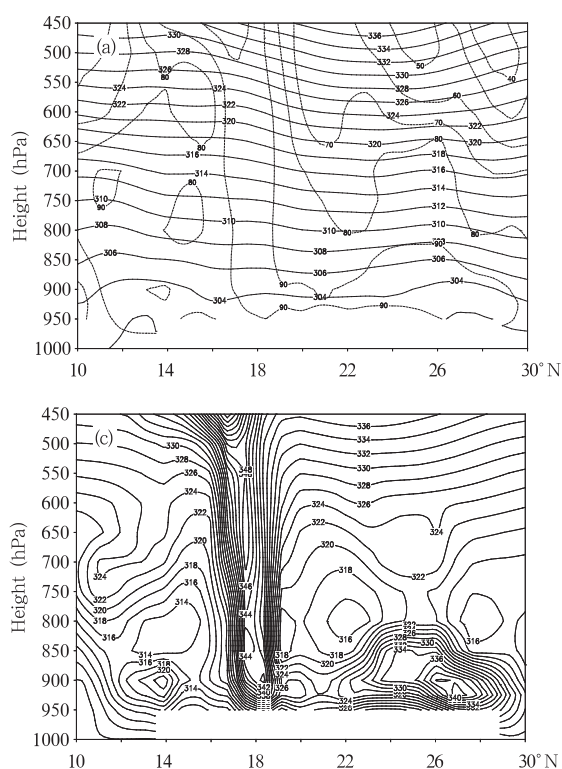


图2 2006年7月12日00时的位温(实线)及相对湿度(虚线)(a),相当位温(b)和广义位温(c)沿129°E剖面(单位:K)

Fig. 2 Cross sections of (a) the potential temperature (solid line) and relative humidity (dashed line), (b) the equivalent potential temperature and (c) the generalized potential temperature along 129°E at 00:00 UTC 12 July, 2006 (unit of PT, EPT and GPT is K)

3 结 论

实际大气的湿度变化是由于干空气到湿空气,最后到饱和湿空气这样一个逐步变化过程,而广义位温的引入恰能反映出这样一个水汽变化的过程,还能方便地运用到实际天气过程的分析。比较了位温、相当位温和广义位温分别在江淮梅雨锋暴雨、华北暴雨和台风暴雨过程中的分布情况。诊断结果表明,与位温和相当位温相比,广义位温能更好地体现实际大气暴雨过程中水汽的集中和水汽梯度效应。同时,由于湿大气的广义位温和干大气位温以及饱和湿大气的相当位温一样,在绝热过程中也具有保守性,在对湿大气动力和热力性质的研究中还会有更广泛的应用。

参考文献

- 王两铭,罗会邦. 1980. 饱和湿空气动力学的基本方程和主要特征. 气象学报, 38(1): 44-50
- 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 53(4): 387-405
- 谢义炳. 1978. 湿斜压大气的天气动力学问题//暴雨文集. 长春: 吉

林人民出版社, 1-15

- 周玉淑,高守亭,邓国. 2005. 江淮流域2003年强梅雨期的水汽输送特征分析. 大气科学, 29(2): 195-204
- Bannon P R. 2002. Theoretical foundations for models of moist convection. J Atmos Sci, 59: 1967-1982
- Ertel H. 1942. Ein neuer hydrodynamischer erhaltungssatz. Naturwissenschaften, 30: 543-544
- Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow. Geophys Res Lett, 31: L12113
- Gao S T, Zhou Y S, Lei T, et al. 2005. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification. Sci China Ser. D Earth Sciences, 48: 128-137
- Hauf T, Holler H. 1987. Entropy and potential temperature. J Atmos Sci, 44: 2887-2901
- Ooyama K V. 1990. A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere. J Atmos Sci, 47: 2580-2593
- Pointin Y. 1984. Wet equivalent potential temperature and enthalpy as prognostic variables in cloud modeling. J Atmos Sci, 41: 651-660
- Tripoli G J, Cotton W R. 1981. The use of ice-liquid water potential temperature as a thermodynamic variable in deep atmospheric models. Mon Wea Rev, 109: 1094-1102