

文章编号: 1001-8166(2007)05-0486-09

# 大气能量有效性的研究进展\*

高 丽<sup>1,2</sup>, 李建平<sup>2</sup>

(1. 中国气象局国家气象中心, 北京 100081; 2 中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京 100029)

**摘 要:**大气能量有效性一直是大气科学研究中的重要组成部分, 在过去的几十年中, 得到了长足发展。对大气能量学特别是能量有效性问题的研究进展进行了全面回顾。为了将能量有效性的研究从全球大气整体向局地或区域尺度拓展, 针对经典有效位能理论中存在的问题提出了扰动位能的新概念, 并初步探讨了其理论和应用问题。在已开展的工作中, 利用 NCEP/NCAR 再分析资料研究了扰动位能的时空结构以及与大气动能之间的联系, 取得了很有意义的结果。

**关 键 词:**能量有效性; 有效位能; 扰动位能; 参考状态; 动能

**中图分类号:** P433      **文献标识码:** A

## 1 引 言

大气能量学是近代气象学发展的一个重要分支, 至今在大气科学许多研究领域, 能量学仍具有显著的地位和重要作用<sup>[1~3]</sup>。大气中能量源汇以及能量转换问题, 一直是大气科学中最重要的问题之一。在大气环流系统的理论研究和诊断分析中, 能量平衡也被当作一个基本课题, 而且, 能量学可以作为度量大气环流变化的一种有效途径, 数值预报模式的动力学方程组必须遵守能量学守恒性约束。同时, 深入了解大气各种物理过程中能量学的相关问题, 对于天气预报与气候预测等问题都具有重要的理论和现实意义。因此, 关于大气能量循环和能量有效性的研究一直以来都是大气科学中非常重要的组成部分。

进一步来看, 大气能量的收支、分布和转化具有明显的局地特征, 各种形式的局地大气能量可能表现出不同的时空分布, 这种局地能量的异常变化必然会对局地大气环流的变动产生重要的影响。目前, 国内外有关大气能量学的研究更多地侧重于考

察整体大气的能量状况和能量收支循环<sup>[2~4]</sup>。因此, 寻找适合于局地能量学问题的理论很有必要, 这将有助于了解区域能量转化状况及其对局地大气环流变动影响的各方面细节, 并有力地推动局地能量学研究的发展。为此, 本文将对大气能量学特别是能量有效性问题的研究进展进行回顾, 并针对经典有效位能理论中存在的问题, 介绍扰动位能的新概念和已有研究情况。

## 2 大气能量学研究概述

### 2.1 全球气候系统能量循环

图 1 给出了气候系统中的能量循环示意图<sup>[3]</sup>。在大气层顶的入射辐射中, 30% 被云和地面反射, 其中地面反射少于云的反射。剩余进入气候系统的 70% 能量中, 20% 被大气吸收, 50% 为海洋和陆地所吸收。在后一部分中, 有 24% 通过蒸发来维持水循环, 并借助水汽的凝结来间接加热大气, 另有 6% 通过感热通量直接加热大气, 剩余 20% 用来加热下垫面, 其中 14% 以红外辐射形式再给予大气, 另外 6% 在大气谱窗区 (8 ~ 12  $\mu\text{m}$ ) 回到外层空间。同时, 大

\* 收稿日期: 2007-02-05; 修回日期: 2007-04-02

\* 基金项目: 国家杰出青年基金项目“长期气候变异动力学及新的气候预测理论研究”(编号: 40325015); 优秀国家重点实验室研究项目“东亚季风形成和变异的诊断、模拟及其可预测性研究”(编号: 40523001); 国家重点基础研究发展计划项目“亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响”(编号: 2006CB403600)资助。

作者简介: 高丽 (1978-), 女, 内蒙古阿拉善人, 工程师, 博士, 主要从事大气动力学和数值天气预报研究。E-mail: gaoli@cma.gov.cn

气吸收的热量用来增加内能和位能,其中有不到 1%被转换成动能,以克服摩擦,维持大气和海洋环

流。最后,大约 64%被大气以红外辐射形式辐射回空间,完成能量循环。

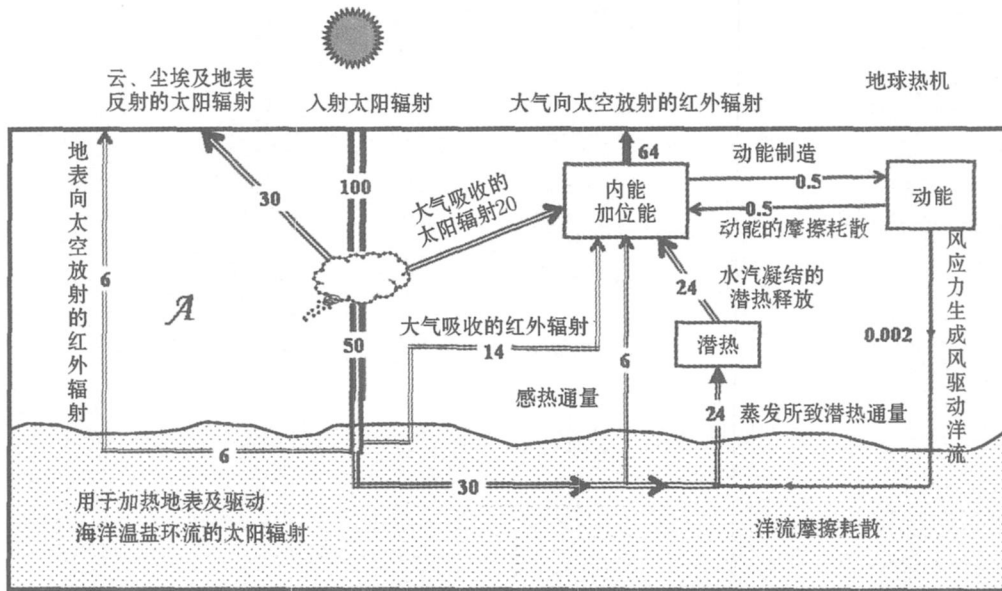


图 1 气候系统中的能量循环示意图<sup>[3]</sup>

Fig 1 Schematic diagram of energy cycle in climate system<sup>[3]</sup>

入射太阳辐射为 100 ( 340 W/m<sup>2</sup>),所有值都是整个大气年平均;为简单起见,未给出海洋(O)、陆地(L)和冰雪圈(C)的能量框图  
The amount of incident solar radiation is taken as 100 ( 340 W/m<sup>2</sup>), all of numbers on Fig 1 are annual mean of whole atmosphere;  
For the sake of simplicity, energy cycles in ocean, land, and cryosphere are not given

### 2.2 大气能量的基本形式、转换和能量循环

能量以各种不同的形式贮存在大气中,单位质量的总大气能量可以表示为如下形式<sup>[2,3]</sup>:

$$E = I + \quad + LH + K$$

这里,单位质量的大气内能 I、重力位势能、潜热能 LH和动能 K分别为:

$$I = c_v T$$

$$= gz$$

$$LH = Lq$$

$$K = \frac{1}{2} (u^2 + v^2)$$

其中,各个符号表示的物理意义同气象中常用变量意义相同。这样通过温度场、重力位势高度场和三维风场就可以确定出大气中各种形式的能量。根据已有研究,一般而言,内能约占大气总能量的 70%;位能次之,占 27%;潜热能约为 2.5%;动能仅占大气总能量的 0.05%。可见,这其中动能占有的比重是很小的,但在大气能量学的有效性研究中,动能及其变化却是十分重要的组成部分。而且,大气运动本身也对全球能量的再分布具有决定性作用。

大气能量学研究的基本目的之一就在于解释大气中各种形式的能量,并从理论和观测两方面确定大气中能量产生、转化和耗散的途径,也就是要描绘大气中的能量流动过程。事实上,正如大气能量平衡方程所刻画的那样,大气中各种形式的能量之间并不是相互独立的,而是存在着一些共同项,以此相互衔接;图 2给出了这些衔接项的示意框图。

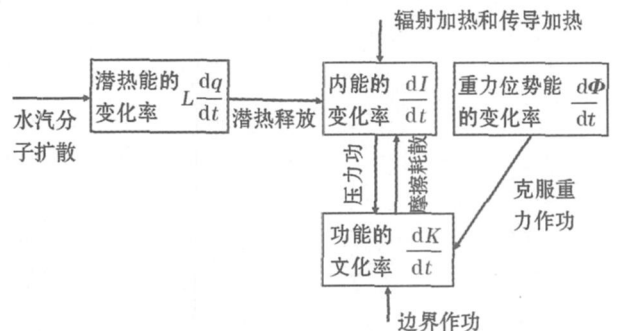


图 2 大气中各种能量形式的衔接示意框图<sup>[5]</sup>

Fig 2 Sketch map of conversions between all kinds of atmospheric energy<sup>[5]</sup>

从图 2 可知,位能的变化率产生于克服重力做功,做功的正负说明存在着位能向动能,或者相反的转变。内能的源或汇为大气加热率(辐射、感热和潜热)和逆压力场压缩做功(即内能向动能转换)。动能通过摩擦耗散转换为内能,这属于不可逆过程。边界上压力和摩擦力做功在大气向海洋的能量转换中起着非常重要的作用,它产生了风驱动的洋流。此外,顺着或逆着重力方向的向上和向下运动或者气压梯度力穿越等压线的大气运动,都能将位能转换为动能或者反之。由于这样的过程可以在 2 个方向进行,属于绝热(可逆)过程。

### 3 大气能量的有效性问题

物体所具有的能量是与其物理状态紧密联系的。假定大气是力学上的孤立系统,那么,大气中总位能与动能的转换是绝热可逆过程,而总位能的制造以及由摩擦引起的动能破坏则都是非绝热不可逆过程。如果大气中除了可逆转换过程外而不考虑其他外部强迫的情况下,则大气运动可看成是绝热运动。如大气的短期运动或者对于系统特征运动时间尺度远小于外源强迫变化时间尺度的运动均可视为是绝热的。在这种条件下,任一气块的位温沿其轨迹应保持不变。换言之,此时的等熵面(等于常数的面)是随空气移动的物质面。这种运动使大气的总能量保持不变,动能的任何增加(减少)必然引起总位能等量的减少(增加)。

#### 3.1 大气热机及其效率

实际上,大气系统并不是孤立的,存在着与外界以及与气候系统中其他子系统之间复杂的能量交换和传递过程。由于摩擦的存在,大气运动必有耗散,现有动能维持不超过 10 天,那么,驱动大气长期运动就必然存在外部的能源补给。对于地球气候系统,太阳辐射无疑是最重要的外部能源。除了一些大气组分的少量吸收以外,太阳辐射并不能直接加热大气,而是通过地面吸收后,以长波辐射、感热和潜热的形式加热大气。大气中最高温度区出现在低纬地面附近,而最低温度区出现在高纬大气上层。另外,大气起着运输器的作用,把能量向极区和向上输送。因此,从整体上看,大气可以认为是一部热机,热量从暖源流向冷汇。大气热机所作的功用来维持环流的动能,抵消摩擦耗散所造成的消耗。

基于上述思想,存在冷热源以及能量流动能力的系统就可以构成热机,因此在大气中存在着不同尺度的大气热机<sup>[6,7]</sup>。由于地球的球面属性,使得

低纬存在能量盈余形成源区,高纬存在能量亏损形成能汇,这种极赤温差导致了全球尺度的第一类大气热机。而由于海陆下垫面热力性质的差异,造成地球表面吸收太阳辐射的不均匀性,进而导致加热大气的能量源汇的水平分布不均,就形成了半球和区域尺度的第二类热机。另外,也存在由于垂直方向能量源汇的分布而形成的其他类型大气热机。热机模型的提出很自然地引发了关于其效率(或者称之为大气能量的有效性问题)的各项研究工作。

研究表明,大气的动能比全位能要小很多,大约不到全位能的千分之一<sup>[8]</sup>,这说明大气中的全位能只有很小一部分能被释放转化成动能。从热机观点看,大气是一个效率很低的热机系统<sup>[8,9]</sup>。这种现象引发了对能量有效性的深入研究。若将大气热机看作理想卡诺热机,其效率也是很低的,这是因为热源温度  $T_w$  与冷汇  $T_c$  的温度之差相对其自身较小,即

$$= \frac{T_w - T_c}{T_w} \quad 10\%$$

尽管已有研究对大气热机(主要是第一类热机)效率估算还存在差异,但基本事实是:实际大气的效率要比理想的极限情形更低。因此,大气热机所产生的动能与全位能(内能和位能之和)相比很小,这在大气各种形式能量的粗略估算中得到体现。

#### 3.2 能量有效性问题

大气能量的有效性可以表示为全位能中能够转换成动能的最大可能部分。这个概念还可用于气候系统的其他子系统,以期考察能量如何驱动大气或海洋热机等。对于正压大气,不存在全位能转换成动能的机制,这是因为水平气压梯度力处处为零。如果大气处于静力平衡状态,由于气压梯度力的垂直分量正好与重力相抵消,不存在净的垂直方向力,这种大气即便含有大量全位能,但都是无法转换成动能的无效大气能量。利用能量有效性理论的观点,可以说这种大气处于“死”的状态。

实际大气是斜压的,并处于准静力平衡状态。在大气内存在着一些区域或子系统,其在等压面上具有不均匀的温度分布。可以说这些局地大气子系统处于“活”的状态,并且作为一个整体来看,大气因此也处于一个“活”的状态。由于大气不是一个完全均匀(典型)的系统,它将通过许多不同自然状态的连续演化,每一种状态都有不同的全位能。当大气从一种自然状态变为另一种时,全位能要发生变化,因此,动能或者产生或者消耗。只有在转换过

程中全位能出现差异,它才能被有效地转换成动能。

大气环流的实际作用是导致有效的位能部分不断消耗,这就需要某种恢复机制使大气环流得以维持。这种机制主要与大气加热的不均匀性相联系。如果整个大气被均匀加热,其全位能将会增加,但没有有效部分产生,这是因为大气结构始终保持正压。另一方面,如果保持位能总量不变,但在不同地方增加和减少热量,这会导致全位能中有效部分产生。虽然大气最初是正压的,但这样将会变成斜压的,促使环流发展(Bjerknes定理<sup>[21]</sup>)。因此,为了保证大气环流是“活”的,需要通过暖区加热和冷区冷却,来不断产生有效的位能。

由此可见,可以将大气中的全位能分解为 2 个组成部分,一个是可以释放转化成动能的部分,另一个是不可释放的部分,它们分别可称为全位能的有效(可利用)和无效(不可利用)部分。因此,人们开展了能量有效性问题的研究,通过大气有效位能的概念来探讨全位能和动能的转换、能量循环以及大气环流运动的维持。

## 4 有效位能理论的研究进展

在能量有效性研究中,有效位能理论占有重要地位。动力气象学通常把大气的能量划分为内能、位能、动能和潜热能等几个基本部分<sup>[3]</sup>。气象学家从一开始研究大气能量学就发现,不像一般机械系统的内能和位能可以分开,大气能量中内能和位能的变化不是独立的,需要把它们结合起来考虑,遂引入了总位能(即全位能)的概念。事实上,大量早期研究发现,绝大部分总位能对天气系统的发展并无用处,只有极少部分可能转换成大气运动的动能。如上节所述,可将大气全位能按对动能转化的效果划分为有效和无效两部分。

### 4.1 有效位能的概念

Margules<sup>[9]</sup>首次指出大气能量转化对风暴发展的贡献,提出了有效动能概念,并由此引发了大气有效位能理论的产生和发展。现代大气能量学的框架来自于 Lorenz<sup>[10]</sup>的杰出工作,它使能量学成为大气环流研究中的重要基本问题。他强调可以转变为动能的那部分有效能量实际上还是总位能,不能称其为“有效动能”,而应是“有效位能”(APE),并将其定义为实际大气全位能与经绝热调整后具有水平、正压、稳定层结的最小全位能之差。

随着 20 世纪四五十年代地面和高空观测的日益增多,对于大气中不同形式能量的认识逐渐从定

性描述发展到定量估算,这就为大气能量学的研究奠定了基础,同时引出了新的科学问题。以大气有效位能和动能产生、转化和耗散为主要研究内容的大气能量收支诊断工作得以广泛开展<sup>[1,11~14]</sup>,采用观测或再分析资料探讨了大气能量平衡问题,给出了很多有意义的结果。与此同时,我国学者也开展了很有特色的研究工作<sup>[15~19]</sup>,在天气学中采用了能量学方法进行研究,雷雨顺<sup>[20]</sup>还从能量收支和转化角度探讨了大气不稳定理论。

在有效位能概念的基础上,Lorenz<sup>[10]</sup>首次给出了全球平均有效位能的定义及其产生的精确和近似表达形式,并进一步将有效位能和动能分解为纬向平均和涡旋部分,由此产生了包含能量产生、转化和耗散在内的著名的 4 种能量模态收支框架。在这个框架中,有效位能的产生主要是由于不同非绝热加热形式(包括辐射、感热、潜热)所造成的,平均能量和扰动能量之间存在相互转化,而扰动能量之间的转化才是真正完成有效位能和动能转化的关键所在。这种水平方向上的能量划分在 Phillips<sup>[21]</sup>的大气环流模式数值模拟试验中得以采用。Boer<sup>[22,23]</sup>和 Egger<sup>[24]</sup>相互探讨了等压坐标系下有效位能的平均和涡旋形式。近些年来的相关研究主要侧重于有效位能产生项的资料诊断工作。

### 4.2 有效位能理论的发展

Lorenz 给出的 4 种能量模态的能量框图是描述大气环流能量学的最佳框架。后来,许多学者扩展了原始的能量循环框架研究。Oort 等<sup>[25~27]</sup>曾对能量方程组进行计算(以纬向平均、扰动有效位能和动能四种能量模态为变量),得到 1 月和 7 月的能量循环图,其结果与 Lorenz 能量方框图较为相似。但 Oort 等使用时空域方法分析能量方程各项,并不能反映季节变化时分波能量的贡献。Saltzman<sup>[28,29]</sup>引入了波数域方程,除给出分波能量贡献外,还包括了非线性项。应用 Saltzman 波数域方程,能提供更多分波特征和波流相互作用信息,如仇永炎<sup>[30]</sup>计算了冬夏分波能流,Baer<sup>[31]</sup>和 Chen<sup>[32]</sup>进一步推广了波数域上的谱能量学。

大气能量循环参数除进行上述空间分解外,在时间上也可分为高频波(小于 10 天)和低频波(大于 10 天)。Sheng 等<sup>[33]</sup>在频率域上展开能量方程,将平均运动分解成 3 个“频带”,即季节平均、低频和高频波动,得到相应的冬夏能量循环情况。Winn-Nielsen 等<sup>[34,35]</sup>和 Smagorinsky<sup>[36]</sup>进一步独立给出了有效位能和动能在垂直方向上的分解,即正压和斜

压分量,前者是基于观测资料诊断研究,后者是运用大气环流模式的试验分析。尽管这些工作从不同角度对有效位能进行划分和深入研究,但本质上仍然是全球平均意义下大气系统的整体行为,无法刻画能量转化的局地特征及其对于局部大气环流运动的影响。

需要指出的是,关于 Lorenz 有效位能的最初推导过程中引入了诸如静力平衡、稳定大气层结、不考虑地形以及忽略潜热能贡献等假定。对此,很多学者在更为宽泛的条件限制下开展了很有意义的研究,如 Dutton 等<sup>[37]</sup>得到了非静力近似下更为准确的能量公式和方程, Taylor<sup>[38]</sup>和曾庆存<sup>[39]</sup>都提出了有效位能研究中地形的影响。特别对于湿有效位能的概念,中外学者几乎是同时提出来,国外是由 Lorenz<sup>[40]</sup>提出,国内是由谢义炳<sup>[41,42]</sup>在第一次全国能量天气学会议之后提出来的。

此外,有效位能概念从不同方面得到新发展,被广泛用于大气、海洋能量学研究。Oort<sup>[43]</sup>和 Huang<sup>[44,45]</sup>发展了海洋有效位能理论。Goddard<sup>[46]</sup>、罗连升等<sup>[47]</sup>分析了 El Niño 和 La Niña 事件期间大气能量的变化情况。李术华等<sup>[48]</sup>讨论了有效位能变化与初夏副热带高压北抬之间的关系。而且,气候模式中有效位能的收支状况也同再分析资料结果进行了对比<sup>[49,50]</sup>。另外, Lorenz 所定义的全球有效位能也被扩展到区域尺度,用于研究有限区域内风暴产生过程中有效位能的变化情况<sup>[51-55]</sup>。虽然这些工作已经认识到有限区域内的能量分布对全球能量的贡献,提出了局地有效位能的概念,但其仅是在 Lorenz 表达式基础上考虑了区域边界能量流动,本质上仍是全球平均意义的能量,没有反映出局地冷热源分布的影响。

#### 4.3 大气参考状态的相关研究

在能量有效性理论研究中,定义一个适当的经历绝热大气过程的大气参考状态是至关重要的。几乎所有有关有效位能的理论研究工作,都不可避免地要探讨大气参考状态的问题,因为这个概念是有效位能理论中的一个基本环节。按照有效位能定义,这样的理想状态应具有最小的全位能。事实上,在绝热大气系统中,根据质量守恒以及通过等熵过程大气的重新分布,可以得到这种状态。因此,在有效位能研究中,要选择出一个具有最小全位能的状态作为大气的理想概念状态,称之为大气参考状态。

很多学者设计了不同形式的参考状态,它们基本上具备了 Lorenz 最早提出的参考状态基本特

性:正压、稳定。在这里,我们将对此做一简单回顾。Lorenz<sup>[8,10]</sup>最早给出不考虑地形的大气参考状态是正压水平的、具有稳定层结和最小全位能。他在推导近似和精确的全球平均有效位能及其产生的表达形式时,引入了诸如静力平衡、稳定大气层结、不考虑地形以及忽略潜热能贡献等假定。随后的许多工作都致力于去掉这些假设,例如, Dutton 等<sup>[37]</sup>研究了非静力近似下的大气参考状态, Taylor<sup>[38]</sup>在考虑地形影响下重新定义了大气参考状态, Lorenz<sup>[40]</sup>探讨了水汽过程对大气参考状态的影响等。

总体来看,上述这些定义都是直接从物理上设计大气参考状态的分布形态,并没有从数学上探讨绝热情形下等熵面上大气的若干性质,也未能从数学和物理两方面对这样的大气参考状态是实际大气状态通过怎样的绝热大气过程而达到、或是否能够达到,进行严格的证明。这些问题对于认识大气参考状态以及能量有效性估算具有重要意义<sup>[56]</sup>。另一方面,很多学者对于大气参考状态所要满足的基本特征和表述进行了一系列理论探讨<sup>[57-63]</sup>。这些工作大多从能量有效性的原始定义和概念出发,对于参考状态的定义是存在差异的,但仍仅限于理论探讨,很难用到实际大气能量有效性度量的估算中。

### 5 经典理论存在的问题

经典的有效位能理论自提出以来,历经半个世纪得到了长足发展。但传统意义上的有效位能是针对全球平均而言的,是大气整体概念,反映了全球积分的全位能向动能转化的最高上限。由于大气能量具有明显的局地分布特征,不同区域的转化最高上限也应不同,这意味着能量转化效率存在明显的区域差异,如亚洲季风区与全球其他地区应具有差别明显的能量收支和转化特征,这对局地大气环流影响的程度也不同,因此,非常有必要考察局地或区域意义下的能量收支状况以及有效位能与动能之间的相互转化问题。

一方面,如果从大气热机角度来看,传统意义上的有效位能反映的是全球尺度热机系统中的全位能向动能转化的最高上限,而区域尺度的大气热机所对应的具有局地意义的有效位能也是非常重要的,这从当前人们越发关注区域气候变化得到佐证。就有效位能的研究来看,不同纬度带上有效位能产生和转化的物理机制也有所不同,热带地区主要通过 Hadley 环流来实现位能与动能的转化,而热带外地区则有赖于斜压不稳定机制。因此,研究局地能

量的有效性对于认识区域尺度大气热机系统的诸多能量学问题具有重要意义。但传统有效位能理论显然不适于研究局地或区域能量的有效性问题,需要提出新理论。

另一方面,在以往全球意义下的整体有效位能研究中,关于地球表面非均匀性对于大气环流的影响作用考虑的很少。虽然有些工作提出了表面有效位能的概念,但基本上仍是限于理论分析,目前还没有实际资料的估算结果。而且,如果考察的是局地能量有效性及其对局地环流的影响问题,特别是那些表面作用显著的区域时,传统概念的局限性是显而易见的。而且,无论是从全球整体平均,还是从局部角度来看,在能量有效性问题的研究中,大气部分和表面部分对于大气环流贡献的相对重要性以及它们在全球和局地尺度上的相互关系问题,都是以往研究中所没有的,这是需要从新的理论视角加以考察的问题。

此外,参考状态的统一性问题也是要着重考察的。不同学者根据自身不同的研究目标,所定义的参考状态是差别较大的。这样的定义都是直接从物理上设计大气参考状态的分布形态,并没有从数学上针对这样的大气参考状态是实际大气状态通过怎样的绝热大气过程而达到、或是否能够达到进行严格的证明,这些基本而关键的问题对于认识大气参考状态及有效位能的概念和计算具有重要意义。而且,从数学上深入探讨参考状态的统一性问题,对于考虑表面非均匀属性在能量有效性研究中的作用也是非常必要的。

### 6 扰动位能的新概念和相关研究

为了适于研究局地能量有效性问题,我们拓展了能量有效性研究中普遍采用的有效位能概念,提出扰动位能(PPE)的新概念<sup>[64,65]</sup>,探讨和分析区域或局地位能和动能相互转换以及局地动能产生问题,从而形成适用于局地大气能量学研究的扰动位能理论。在新的理论框架下,从能量有效性的原始定义出发,深入探讨了大气参考状态的基本特征和所必须遵循的物理约束,并推导出扰动位能的数学表达形式,其中第一阶矩项与第二阶矩项具体表示为:

$$P_{A1} = \frac{1}{d} \int_0^{p_s} T dp$$

$$P_{A2} = \frac{p_0}{2} \int_0^{p_s} \frac{T^2}{p^{1+\alpha}} \left( - \frac{\partial T}{\partial p} \right)^{-1} dp$$

显然,扰动位能的一阶矩项可正可负,而二阶矩项恒正。利用 NCEP/NCAR 再分析资料研究了扰动位能的时空结构以及与大气动能之间的联系。结果表明,二阶以上的扰动位能高阶矩项相对于其一阶矩项和二阶矩项来说是少量,可忽略,扰动位能二阶矩项的全球平均恰好等于传统的有效位能;扰动位能的分布在局地与其一阶矩项的情形相似,很多区域一阶矩要比二阶矩大一个量级,而在垂直方向上,扰动位能主要集中在对流层下层,并且有明显的季节变化。在这些初步工作基础上,今后将利用提出的 PPE 概念和理论考察局地环流能量收支状况、表面扰动位能的作用以及它们在大气环流变化研究中的应用。

由此可见,扰动位能表征的是在全球大气参考状态意义下,局地全位能与参考态全位能之差,反映了局地全位能与动能之间相互转化部分。值得注意的是,这里并未称作局地有效位能,对比 Smith 等<sup>[51,52]</sup>的概念,他们的研究本质上还是全球平均意义下的有效位能,仅仅是考虑了区域边界流动;而且,由于定义局地参考状态没有意义,我们所采用的参考状态仍然是全球意义的。此时,扰动位能将是正有负的,这与以往研究中全球平均有效位能恒正的情况不同。在达到参考状态的过程中,正的扰动位能区域有利于通过绝热大气过程完成有效位能向动能的转化,而扰动位能为负的区域则可能需要从正值区域进行“全位能填补”才能完成向参考状态的绝热大气过程。

当然,扰动位能如何应用到实际天气和气候问题研究中?探讨它对区域大气环流的季节内、年际以及年代际等时间尺度的气候变率研究有何意义?考察它对区域性气候变化的影响如何?等等一系列问题,都是伴随着扰动位能概念的提出而自然产生的。正是由于以往研究中采用的是平均意义的有效位能,考察的是大气系统的整体特性,这就大大限制了能量有效性理论的应用范围。而相比之下,扰动位能可以涵盖全球—区域—局地各种空间尺度大气热机系统的能量转化有效性问题,从而具有更加广阔的应用前景。

### 7 结 论

大气能量是衔接外部热源与大气环流变化的桥梁和纽带。一直以来关于大气能量循环和能量有效性的研究都是大气科学中非常重要的组成部分。为此,本文有针对性地对大气能量有效性的研究进展

进行了全面系统的回顾。以 Lorenz 经典有效位能概念为理论基础的能量有效性问题,在过去的几十年中得到了深入研究。随着人们对局地气候学问题的日益关注和深入研究,客观上需要从能量学的角度考察局地能量的有效性、局地大气能量转换等重要问题。由于传统理论中将大气整体作为研究对象,使其实际应用大受限制。

为了将能量有效性的研究从全球大气整体向局地或区域尺度拓展,我们提出了扰动位能的新概念,以期考察局地意义上大气位能与动能之间的相互转换。在此基础上,探讨了大气参考状态的一些性质,利用再分析资料考察了扰动位能的时空气候特征以及与大气动能的一些联系,取得了很有价值的结果。扰动位能是研究局地环流能量变化、转换和循环的重要物理量,这一概念对于研究局地或区域性的天气气候变化是有应用价值的。在后续工作中,我们将利用扰动位能的概念和理论对局地环流能量收支、表面扰动位能的作用等进行分析,并探讨它们在大气环流变化研究中应用问题。总之,扰动位能概念和理论为研究局地能量有效性问题提供了一条新途径;相关研究和应用才刚刚开始,还需要开展大量工作。

#### 参考文献 (References):

- [1] Van Mieghem J. Atmospheric Energetics[M]. Oxford: Clarendon Press, 1973: 1-306
- [2] Liu Shikuo, Liu Shida. The Atmospheric Dynamics[M]. Beijing: Peking University Press, 1991. [刘式适,刘式达. 大气动力学(上册)[M]. 北京:北京大学出版社,1991.]
- [3] Peixoto J P, Oort A H. Physics of Climate[M]. Springer-Verlag, New York: American Institute of Physics Press, 1992: 1-520. [Peixoto J P, Oort A H. 气候物理学[M]. 吴国雄,刘辉,等校译. 北京:气象出版社,1995: 1-288.]
- [4] Zhang Tao. Atmospheric Energetics of the Climate System[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001: 1-200. [张韬. 气候系统中大气能量学的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2001: 1-200.]
- [5] Peixoto J P, Oort A H. Physics of climate[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1984, 56: 365-429.
- [6] Zhang Jiacheng. Cold source effect of polar ice and monsoon[J]. *Meteorological Monthly*, 1981, 79(7): 6-8. [张家诚. 极冰的冷源作用和季风[J]. 气象,1981,79(7): 6-8.]
- [7] Zhao Tianliang, Xu Xiangde, He Jinhai, et al. Numerical experiments on impact of two types of atmospheric heat engines to atmospheric general circulation[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1992, 8(1): 52-59. [赵天良,徐祥德,何金海,等. 两类大气热机对大气环流型影响的数值试验[J]. 热带气象学报,1992,8(1): 52-59.]
- [8] Lorenz E N. The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere[M]. Geneva: World Meteorological Organization publication, 1967: 97-107.
- [9] Margules M. Ber die energie der st rme[J]. *Jahrbucher der Zentralanstalt fur Meteorologie und Geodynamik*, 1903, 40: 1-26.
- [10] Lorenz E N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation[J]. *Tellus*, 1955, 7(2): 157-167.
- [11] Spar J. Energy changes in the mean atmosphere[J]. *Journal of Meteorology*, 1949, 6: 411-415.
- [12] Oort A H. On estimates of the atmospheric energy cycle[J]. *Monthly Weather Review*, 1964, 92(11): 483-493.
- [13] Price P G. A comparison between available potential and kinetic energy estimates for the southern and northern hemispheres[J]. *Tellus*, 1975, 27(5): 443-452.
- [14] Demott C A, Randall D A. Observed variations of tropical convective available potential energy[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D02102.
- [15] Xie Yibing. A Preliminary survey of certain rain-bearing systems over China in spring and summer[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1956, 27(1): 1-24. [谢义炳. 中国夏半年几种降水天气系统的分析研究[J]. 气象学报,1956,27(1): 1-24.]
- [16] Qiu Yongyan. An investigation of the structure of the cold front and the upper horizontal temperature field in a case of cold air outbreak[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1957, 28(1): 13-26. [仇永炎. 在一种寒潮情况下的水平温度场及冷锋构造[J]. 气象学报,1957,28(1): 13-26.]
- [17] Gu Zhenchao, Chen Xiongshan, Xu Youfeng. Frontal se chart and its application to the analysis of upper boundary of cold-wave front in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1958, 29(1): 44-56. [顾震潮,陈雄山,许有丰. 锋面假相当位温图和它对 中国寒潮冷锋上界变化分析的应用[J]. 气象学报,1958,29(1): 44-56.]
- [18] Tao Shiyan. Studies on Some Problems of Subtropical Synoptic Systems in Summer China[M]. Beijing: Science Press, 1963: 59-105. [陶诗言. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究[M]. 北京:科学出版社,1963: 59-105.]
- [19] Yu R C, Zhang M H, Robert D C. Analysis of the atmospheric energy budget: A consistency study of available data sets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 108(D8): 9 655-9 661.
- [20] Lei Yushun. Energy Synoptics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1986. [雷雨顺. 能量天气学[M]. 北京:气象出版社,1986.]
- [21] Phillips N A. The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 1956, 82: 123-164.
- [22] Boer G J. Zonal and eddy forms of the available potential energy equations in press coordinates[J]. *Tellus*, 1975, 27(5): 433-442.
- [23] Boer G J. Reply to Egger[J]. *Tellus*, 1976, 28(4): 379.
- [24] Egger J. Comments on Zonal and eddy forms of the available potential energy equations in press coordinates by G J Boer[J]. *Tellus*, 1976, 28(4): 377-378.

- [25] Oort A H, Peixoto J P. The annual cycle of the energetics of the atmosphere on a planetary scale [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79 (18): 2 705-2 719.
- [26] Oort A H, Peixoto J P. On the variability of the energy cycle within a five-year period [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81 (21): 3 643-3 659.
- [27] Oort A H, Peixoto J P. Global angular momentum and energy balance requirements from observation [J]. *Advances in Geophysics*, 1983, 25: 355-486.
- [28] Saltzman B. Equations governing the energetics of the larger scales of atmospheric turbulence in the domain of wave number [J]. *Journal of Meteorology*, 1957, 14: 513-523.
- [29] Saltzman B. Large-scale atmospheric energetics in the wave-number domain [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1970, 8: 289-302.
- [30] Qiu Yongyan. Medium-Range Weather Forecasting [M]. Beijing: Beijing Meteorological Press, 1985. [仇永炎. 中期天气预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1985.]
- [31] Baer F. Hemispheric spectral statistics of available potential energy [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31 (4): 932-941.
- [32] Chen T C. A further study of spectral energetics in the winter atmosphere [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110 (8): 947-961.
- [33] Sheng J, Detome J. An observational study of energy transfer between the seasonal mean flow and eddies [J]. *Tellus*, 1991, 43A (2): 128-144.
- [34] Wiin-Nielsen A, Brown J A Jr. On diagnostic computations of atmospheric heat sources and sinks and the generation of available potential energy [R]. Proceedings of the international symposium on numerical weather prediction, Tokyo, Japan, November 7-13, 1960. Meteorological Society of Japan, Tokyo, March, 1962: 593-613.
- [35] Wiin-Nielsen A, Chen T C. Fundamentals of Atmospheric Energetics [M]. New York, Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [36] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment [J]. *Monthly Weather Review*, 1963, 91 (3): 99-164.
- [37] Dutton J A, Johnson D R. The theory of available potential energy and a variational approach to atmospheric energetics [J]. *Advances in Geophysics*, 1967, 12: 333-436.
- [38] Taylor K E. Formulas for calculating available potential energy over uneven topography [J]. *Tellus*, 1979, 31: 236-245.
- [39] Zeng Qingcun. The Physical-Mathematical Basis of Numerical Weather Prediction (Vol 1) [M]. Beijing: Science Press, 1979. [曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础 (第 1 卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [40] Lorenz E N. Available energy and the maintenance of a moist circulation [J]. *Tellus*, 1978, 30: 15-31.
- [41] Xie Yibing. Current status and future possible development of energetic synoptic analysis and prediction method [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1978, 2: 5-9. [谢义炳. 能量天气分析、预报方法的现状和将来的可能发展 [J]. 气象科技, 1978, 2: 5-9.]
- [42] Xie Yibing. Weather dynamics problems of moist baroclinic atmosphere [C]. Collection of Heavy Rain. Changchun: Jilin People Press, 1978: 1-15. [谢义炳. 湿斜压大气的天气动力学问题 [C]. 暴雨文集. 长春: 吉林人民出版社, 1978: 1-15.]
- [43] Oort A H, Asher S C, Levitus S, et al. New estimates of the available potential energy in the world ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 3 187-3 200.
- [44] Huang Ruixin. Mixing and available potential energy in a Boussinesq ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28: 669-678.
- [45] Huang Ruixin. Available potential energy in the world's oceans [J]. *Journal of Marine Research*, 2005, 63: 141-158.
- [46] Goddard L, Philander S G. The energetics of El Niño and La Niña [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13 (9): 1 496-1 516.
- [47] Luo Liansheng, Yang Xiuqun. Interdecadal change of El Niño as seen from variations of APE [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 23 (1): 1-11. [罗连升, 杨修群. 从有效位能变化来分析 El Niño 的年代际变化 [J]. 气象科学, 2003, 23 (1): 1-11.]
- [48] Li Shuhua, Zhu Fukang, Fu Hengliang, et al. Relationship between increment of large-scale eddy APE and northward movement of subtropical high in early summer [J]. *Meteorological Monthly*, 1989, 15 (12): 21-25. [李术华, 朱福康, 傅恒亮, 等. 大尺度涡动有效位能增长与初夏副热带高压北移的关系 [J]. 气象, 1989, 15 (12): 21-25.]
- [49] Zhang Tao, Wu Guoxiong, Guo Yufu. The diabatic heating and the generation of available potential energy: Results from NCEP reanalysis [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 19: 143-159.
- [50] Zhang Tao, Wu Guoxiong, Guo Yufu. The comparison between two versions of the GOALS model on the atmospheric energy cycle diagnosis [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30 (1): 38-55. [张韬, 吴国雄, 郭裕福. GOALS 模式中大气能量循环的诊断分析与不同版本计算结果的比较研究 [J]. 大气科学, 2006, 30 (1): 38-55.]
- [51] Smith P J. A computational study of the energetics of a limited region of the atmosphere [J]. *Tellus*, 1969, 21 (2): 193-201.
- [52] Smith P J. On the contribution of a limited region to the global energy budget [J]. *Tellus*, 1969, 21 (2): 202-207.
- [53] Johnson D R. The available potential energy of storms [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1970, 27 (5): 727-741.
- [54] Edmon H J Jr. A reexamination of limited-area available potential energy budget equations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35 (9): 1 655-1 659.
- [55] Gu Xuzan. A theoretical study of the available potential energy in a limited atmospheric region [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, 48 (2): 248-252. [辜旭赞. 有限区域有效位能理论再探 [J]. 气象学报, 1990, 48 (2): 248-252.]
- [56] Gao Li, Li Jianping, Ren Hongli. Some characteristics of the atmosphere during an adiabatic process [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16 (2): 243-247. [高丽, 李建平, 任宏利. 绝热

- 大气过程的若干性质 [J]. 自然科学进展, 2006, 16 (2): 243-247. ]
- [57] Van Mieghem J. Energy conversion in the atmosphere on the scale of the general circulation[J]. *Tellus*, 1952, 4: 334-351.
- [58] Pearce R P. On the concept of available potential energy [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 1978, 104: 737-755.
- [59] Plumb R A. A new look at the energy cycle [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40: 1 669-1 688.
- [60] Mchall Y L. Available potential energy in the atmosphere [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1990, 42: 39-55.
- [61] Shepherd T G. A unified theory of available potential energy [J]. *Atmosphere-Ocean*, 1993, 31 (1): 1-26.
- [62] Kucharski F. On the concept of exergy and available potential energy [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 1997, 123: 2 141-2 156.
- [63] Gu Xuzan. Further investigation of the theory of available potential energy in planetary atmosphere [J]. *Tropical Meteorology*, 1989, 5 (3): 268-278. [辜旭赞. 行星大气有效位能之进一步探讨 [J]. 热带气象, 1989, 5 (3): 268-278. ]
- [64] Gao Li. Theoretical Studies and Diagnostic Analyses of Perturbation Potential Energy [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2006: 1-138. [高丽. 扰动位能的理论研究和诊断分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 1-138. ]
- [65] Li Jianping, Gao Li. Theory on perturbation potential energy and its applications—Concept, expression and spatio-temporal structures of PPE [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30 (5): 834-848. [李建平, 高丽. 扰动位能理论及其应用? ——扰动位能的概念、表达及其时空结构 [J]. 大气科学, 2006, 30 (5): 834-848. ]

## Progress in the Study of Atmospheric Energy Efficiency

GAO Li<sup>1,2</sup>, LI Jianping<sup>2</sup>

(1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The efficiency of atmospheric energy is an important component of atmospheric science research all along and has been evidently developed in the past tens of years. The present paper aims at a comprehensive review of the research progress of atmospheric energetics, especially for its efficiency problem. Focused on some problems existing in the classical theory of available potential energy, a new concept named as perturbation potential energy (PPE) has been put forward in order to extend the scale of energetic efficiency from global to local or regional atmosphere. Furthermore, some theoretical and applied problems have been preliminarily studied. Mathematical expressions have been derived and their physical senses have been discussed. In previous works, some characteristics of PPE including climatology, basal spatio-temporary features, and associations between PPE and atmospheric kinetic energy, have been diagnosed by using NCEP/NCAR reanalysis dataset, and many meaningful results have been obtained. In fact, it can be seen that the PPE is an crucial physical variable for research on variation, transform and cycle of local circulation energy, which will play an important role in investigating local or regional weather and climate change.

**Key words:** Available potential energy; Energy efficiency; Perturbation potential energy; Atmospheric reference state; Atmospheric kinetic energy.