

大气角动量的研究进展

石文静^{1,2} 杨萍¹ 肖子牛^{1,2}

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

摘要: 地球系统由固体地球、大气和海洋等流体层组成。在自转的地球上相对于地球表面运动的空气, 因受到摩擦和山脉的作用, 与转动地球之间产生转动力矩, 即为大气角动量 (Atmospheric angular momentum, AAM)。早期有关AAM的研究主要用于解释大气环流中信风和盛行西风得以维持的原因, 而近些年来研究者更注重研究AAM的变化问题, 包括山脉和摩擦力矩、角动量及其输送的季节、年际和年代际等多时间尺度的变化问题, 并将其与日长 (Long of day, LOD) 变化、厄尔尼诺和南方涛动等地球、海洋和大气现象联系起来。作为一个描述大气环流的基本变量, AAM的平衡和异常反映了大气活动与固体地球、海洋在多时空尺度上的耦合过程。比如, 大气的季节性质量重新分布 (大气压) 和运动 (纬向风) 的驱动 (也就意味着AAM发生了变化) 可导致LOD随之发生相应的季节性变化; 从角动量守恒的角度来讲, 当大气自西向东的角动量增加时, 固体地球的角动量必然减小, 地球自转速度减慢, LOD增大, 反之亦然。因此, AAM的研究一直以来都受到气象学家、天文学家和地球科学家等的青睐。主要总结了20世纪80年代以来在地球系统角动量交换和平衡、AAM的变化及其与大气、海洋活动、地球自转的联系等方面的相关研究进展, 并指出了当前研究中所存在的一些问题, 为未来的科学研究提供参考。

关键词: 大气角动量, 收支平衡, ENSO, 研究进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.002

Progress in Studies on the Atmospheric Angular Momentum

Shi Wenjing^{1,2}, Yang Ping¹, Xiao Ziniu^{1,2}

(1 China Meteorological Administration (CMA) Training Centre, Beijing 100081

2 Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology (NUIST), Nanjing 210044)

Abstract: The earth system is composed of solid Earth, Atmosphere, Oceans and other fluid layers. On the Earth, the atmospheric angular momentum (AAM) is produced between the Earth and the air moving on its surface due to the friction and the mountains. Early studies on AAM are mainly used to explain why the trade winds and the prevailing westerlies maintain in the atmospheric circulation, but recently scientists have paid more attention to researches on the variation of AAM, including mountains and friction torque, angular momentum and its transportation variations on seasonal, interannual, decadal and multi-time scales, and connected these variations with length of day (LOD), ENSO and other Earth, Atmosphere and Oceans activities. As a basic variable to describe the atmospheric circulation, the balance of AAM and its anomalies reflects the coupling process between solid Earth, Atmosphere and Oceans on multi-temporal and spatial scales, for example, the seasonal atmospheric mass redistribution (atmospheric pressure) and the driven atmospheric motion (zonal wind) (which means AAM changes) can cause LOD seasonal changes. From the perspective of the law of the angular momentum conservation, when the AAM increases, the angular momentum of the solid Earth inevitably decreases with the Earth's rotation speed slowing down and LOD increases, and vice versa. Therefore, the research on AAM has always been favored by meteorologists, astronomers and Earth scientists. This paper mainly summarizes the research progress about the exchange of momentum in the Earth-Atmosphere system and its balance, the AAM's changes and its relation to the Atmosphere, Ocean activities, and Earth's rotation since the 1980s, and points out some problems existing in current researches in order to provide references for future studies.

Keywords: atmospheric angular momentum (AAM), budget and equilibrium, ENSO, research progress

收稿日期: 2013年12月12日; 修回日期: 2014年4月22日
 第一作者: 石文静 (1986—), Email: shiwenjing_005@163.com
 通信作者: 肖子牛 (1965—), Email: xiaozn@cma.gov.cn
 资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB957804);
 国家自然科学基金资助项目 (41375069,
 41175051); 江苏省普通高校研究生科研创新
 计划 (CXZZ13_0517)

1 引言

早期的大气角动量 (atmospheric angular momentum, AAM) 作为研究大气环流的主要工具之一而被人们熟知, 它将大气与地球相联系, 用以阐明大气环流中的机制问题。以Ferrel^[1]于1856年引进一个在他以前不为任何气象工作者所认识的“新”的力 (即科氏力的南北分量) 为界, 在这之前, 人们更多

地认为大气在运动中是角速度在守恒，而没有认识到角动量这个概念。早在17世纪30年代，Hadley在绝对速度而不是绝对角动量守恒的假设下就得出结论：如果一空气质点开始流向赤道时没有向东或向西的相对运动，由于低纬地区地球向东运动得快，要保持质点的绝对速度，在到达较低纬度时质点就会具有相对于地球的向西运动。但他发现，当空气向南运动了很大一段距离后所应有的向西的风速要比实际观测到的大得多。这里明显的一个错误就是在没有东西向力存在的条件下，向赤道或极地运动的空气不保持其绝对速度，而保持其绝对角动量。之后，Thomson^[2]和Oberbeck^[3]等气象学家在研究大气环流图案时，陆续开始关注了角动量平衡的问题。直到1926年，Jeffreys^[4]在研究气旋的作用时，才真正把角动量的观念应用起来。

由于地球自转，相对地球表面运动的空气受到摩擦和山脉作用，与转动地球之间产生转动力矩（即角动量）。因而，绕地轴旋转的单位质量空气的绝对角动量可表示为^[5]：

$$M = M_r + M_\Omega$$

式中，相对角动量 $M_r = a \cos \varphi u$ ，地球角动量 $M_\Omega = a^2 \Omega \cos^2 \varphi$ ， u 为空气的纬向风速， Ω 为地球自转角速度， a 是地球半径， φ 是纬度。

单位体积气块的绝对角动量的个别变化又取决于沿纬圈的压力差（由于山脉作用产生的压力矩）和摩擦力矩：

$$\frac{dM}{dt} = T_m + T_f$$

式中，山脉力矩 $T_m = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$ ，摩擦力矩 $T_f = a \cos \varphi \cdot F_\lambda$ ， λ 是经度， ρ 是大气密度， p 是气压， F_λ 是摩擦力纬向分量。

山脉力矩的物理意义又是怎样的呢？比如，在西风带的某一纬圈上有一座山，在西风气流的作用下，山脉西侧迎风坡处气压值比东侧背风坡处气压值高（即存在向东的气压梯度力），气压力矩将使地球加速向东转动，因而大气损耗了西风角动量，绝对AAM将减弱。对于摩擦力矩，东风的情况下， $F_\lambda > 0$ ，摩擦力矩是正的，使得绝对AAM增加。

长期以来，地球表面上不停环绕地球做相对运动的东西风带平均而言维持不变的事实，说明在没有外力矩和不考虑海洋的作用下，地球和大气闭合系统中绝对角动量是守恒的。到20世纪50年代，有关地气系统角动量交换和平衡及其物理机制等问题已出现大量研究^[6-9]。对角动量平衡的研究经常涉及到山脉力矩、摩擦力矩以及大气自身对大气内部角动量的水平和垂

直输送^[6,9]。早在20世纪60年代，Bjerknes^[10]就把太平洋上发生的增温现象看成是大尺度海气相互作用的结果。到20世纪80年代初，Stefanick^[11]发现AAM的年内变化与南方涛动联系密切，同时，研究者还发现了AAM的季节和季节内变化及其与一些季节内气候振荡的可能联系。从此，这一领域逐渐得到重视。随着观测仪器和观测手段的进步，长时间序列观测资料的获取成为可能，近些年研究者又开始致力于探索AAM的年代际变化及其与年代际气候振荡的联系，包括其内在的物理机制等问题。

在讨论地气系统绝对角动量平衡时，必须要清楚大气与地球之间的角动量交换，这可以由两种方式得到：一种是通过计算大气与地球之间的摩擦应力得到，另一种是间接地由昼夜长度年变化来计算。可见，AAM和地球日长（length of day, LOD）变化之间也存在密不可分的联系。20世纪80年代以来，研究者对AAM的变化与LOD的联系给予了很多关注，最具有代表性的就是Langley等^[12]给出了AAM变化与LOD变化之间的定量关系。

本文基于对已有关于AAM研究的回顾，从角动量平衡（包括大气内部角动量输送、摩擦力矩、山脉力矩）、AAM的变化（包括季节和季节内、年际、年代际甚至更长周期的变化）及其与大气、海洋活动、地球自转的联系等几个方面，梳理了近期国内外在该领域的研究成果，为更好地开展该领域的研究工作提供一定的参考。

2 角动量交换及收支平衡

2.1 角动量输送

众所周知，大气在东风带通过摩擦和山脉作用获得地球给予的西风角动量，在西风带里又通过摩擦和山脉的作用失去得到的西风角动量。长期以来，东风带并没有因获得西风角动量而使东风减弱，西风带也没有因失去西风角动量而使西风减弱，为维持东西风带，全球范围内的AAM必须是守恒的，这就意味着大气内部必须有角动量的输送，包括水平输送和垂直输送^[5]。

大气内部角动量的水平输送主要包括平均经圈环流、定常涡旋以及瞬变涡旋的相对AAM输送^[5]。通过计算大气内部角动量水平输送的各项，可以发现与瞬变涡旋相比，定常涡旋和平均经圈环流导致的AAM水平输送的总垂直积分值要小很多，尤其是北半球夏季，这说明AAM的水平输送主要依赖于瞬变涡旋来完成。瞬变涡旋对AAM输送的峰值不论冬、夏季还是南、北半球均出现在30°纬度附近。然而，冬季低纬

度平均经圈环流对AAM的输送比较显著,这说明冬季低纬地区Hadley环流很重要。

要维持大气内部角动量守恒,除了角动量水平输送以外,必须有垂直输送的协同才能完成^[5]。由于最大的AAM水平输送出现在对流层上部,而AAM的源汇分布在地面,与地表风带的分布一致,因此热带东风带里就有向上的AAM输送,中高纬西风带里就有向下的AAM输送,从而维持整个大气内部角动量的平衡^[13]。

20世纪20年代,Jeffreys^[4]就指出地球和大气之间存在系统的角动量交换,强调了角动量水平输送的必要性及输送机制。叶笃正等^[6]进一步指出AAM通过大气环流槽脊的南北输送保持绝对角动量守恒。Starr^[14]阐述了大气中大型涡旋对角动量输送的重要作用。叶笃正等^[15]认为经圈环流对AAM的输送作用也很重要,在中高纬度地区大型涡旋是角动量的主要输送者,而在低纬度地区经圈环流的作用将大大增加。吴国雄等^[16]也赞同平均经圈环流对AAM平衡有重要作用的观点。

Feldstein^[17]对季节内尺度上相对AAM的向极传播现象做了深入研究,指出相对AAM的向极传播现象在两半球冬、夏季均存在。与中纬度相比,副热带和高纬度的向极传播更快、更均一,并指出高纬度相对AAM的向赤道传播发生在向极传播之后。通过研究AAM的收支平衡,他还发现相对AAM的变化主要取决于涡旋角动量通量散度和摩擦力矩,而摩擦力矩主要起到削弱相对AAM的作用。在副热带和中纬度地区,相对AAM的向极传播受到高频涡旋($<10d$)角动量通量散度的影响;而在高纬度地区,相对AAM的传播主要受到高低频交叉涡旋和低频($>10d$)涡旋角动量通量散度之和的影响。相对AAM首先受到高频瞬变涡旋的反馈作用,向极传播并不断加强,一旦相对AAM获得最大振幅,就转换成受到高低频交叉涡旋和低频涡旋共同的反馈作用,加之摩擦力矩的作用,导致相对AAM衰减。此外,他还指出,副热带和中纬度相对AAM的向极传播主要受到高频瞬变涡旋角动量辐合的作用,而高纬度则是高低频交叉涡旋和低频瞬变涡旋角动量辐合的作用。然而,对于北半球冬季而言,由定常涡旋和瞬变涡旋相互作用而导致的涡旋角动量通量的异常对相对AAM向极传播的变化也有一定影响。James等^[18]则认为相对AAM的向极传播很可能以类似平流层爆发性增温的方式导致波一流相互作用。Huang等^[19]的研究则表明在年际变化尺度上,热带地区角动量的向极传播将热带和极区的气候变化联系起来,这种角动量的向极传播和一些气候振荡(比

如ENSO、PNA、NAO、AO、AAO和PSA等)的联系密切。

2.2 山脉力矩、摩擦力矩的作用

摩擦和山脉力矩是地球和大气之间角动量交换的两种主要途径,它的变化和异常在AAM交换中起着重要作用。早在1950年左右,摩擦和山脉力矩在天气系统角动量交换中的相对作用及与一些天气尺度系统的关系等研究已经得以重视和开展。

在气候态平均上,摩擦力矩主要来自南、北纬 60° 以内地区,极区摩擦力矩很小。具体而言,两半球中低纬度(南北纬 30° 以内)地区多为正值,表明低纬度地区大气通过摩擦力矩获得地球给予的角动量;中高纬度(南北纬 $30^\circ-60^\circ$)地区摩擦力矩为负值,表明大气通过摩擦力矩失去角动量。中低纬度和中高纬度地区摩擦力矩于半球冬季达到极值,中心分别位于 15° 和 45° 附近;而夏季最小。北半球山脉力矩主要集中在 $60^\circ N$ 以南,南半球山脉力矩主要集中在 $35^\circ S$ 以北。 $30^\circ-43^\circ N$ 、 $0^\circ-11^\circ S$ 、 $15^\circ S$ 和 $30^\circ S$ 附近山脉力矩常年为正,即大气通过山脉力矩获得角动量。 $22^\circ-30^\circ N$ 及 $15^\circ S$ 南北两侧山脉力矩常年为负,即大气通过山脉力矩失去角动量。由于地形的复杂性,山脉力矩的季节变化比摩擦力矩复杂。

早期研究中,White^[8]认为摩擦力矩和山脉力矩的贡献相当。Oort等^[20]通过计算1958年5月—1963年4月 $10^\circ S-80^\circ N$ 范围内的大型山脉力矩的逐月数据,发现山脉力矩的年际变化非常显著,尤其是冬半年。他还强调对于整个北半球而言,山脉力矩和摩擦力矩同等重要,两个力矩均是夏季为角动量汇,冬季为角动量源。Swinbank^[21]则持不同观点,认为两者的相对重要性取决于时间尺度,在不同的时间尺度上两者的贡献有所不同。基于包含地形和边界层方案的UKMO大气环流模式(GCM),Swinbank^[21]计算了全球摩擦力矩和山脉力矩的逐日资料,对数据分析发现山脉力矩是全球AAM短周期变化的主要贡献者。在AAM年际变化尺度上,山脉力矩的作用相对更为重要,AAM的变化与太平洋上大气质量相对固体地球的再分布(ENSO)息息相关^[10, 22]。而在年代际变化尺度上,摩擦力矩的贡献显著^[23]。Iskenderian等^[24]通过高频滤波处理,发现中纬度山脉(落基山、喜马拉雅山、安第斯山)力矩对AAM的高频振荡($<14d$)贡献很大,而热带和极区山脉力矩、摩擦力矩对这一高频振荡的作用要小很多。Weickmann^[25]认为在季节内尺度上,全球山脉力矩和摩擦力矩有显著超前滞后相关,摩擦力矩超前于山脉力矩。这种关系说明了两种基本

反馈机制，即山脉力矩触发全球AAM发生变化，而摩擦力矩抑制这种变化；摩擦力矩的变化与中纬度海平面气压的变化相联系，继而影响山脉力矩异常。

山脉、摩擦力矩与天气系统的变化关系在近十多年研究较多。王亚非等^[26]对1998年5—6月喜马拉雅山AAM收支与东亚天气尺度系统变化的联系进行了考察，发现喜马拉雅山山脉、摩擦力矩与梅雨锋区700hPa高度场均有显著相关，且这种相关存在6d左右的周期。山脉力矩与梅雨锋区高度场有较高的同时和滞后6d的正相关；而摩擦力矩与梅雨锋区的高度场有提前3d和滞后3~6d的显著正相关，这说明喜马拉雅山摩擦力矩可能影响着其下游的一个6d左右的天气尺度系统扰动，而下游的这种扰动很可能影响山脉力矩的大小，也就是说假设当东亚区域西风气流加大时导致了负摩擦力矩加大，从而使得相对AAM减少，3d后在梅雨区域上会出现低压系统增强。这种增强使得喜马拉雅山山脉力矩有负增长，导致相对AAM继续减少，而这种负增长很可能再导致西风气流的加强，造成负摩擦力矩增强。如果没有正角动量的平流输送，这种正反馈效应可能会导致梅雨锋附近的低压持续增强。Egger等^[27]研究指出，当北大西洋系统东移经过地中海地区的群山时，该地区的山脉力矩会发生相应变化，进而影响经过山脉的气流的角动量。对于东移的大尺度系统（系统的水平尺度大于山脉），当系统等压线呈西南—东北走向时，这种作用主要体现在山脉力矩的纬向分量上；当系统等压线呈西北—东南走向时，这种作用主要体现在山脉力矩的经向分量上。在这种系统气压场上的配置下，由于山脉作用，将产生低层（4000m以下）气压场上的扭曲，使得经过山脉的气流的角动量减少。这种低层气压场上的扭曲与阿尔卑斯山山脉力矩有滞后 $t \leq 0d$ （ t 为滞后时间）的正相关，与小亚细亚山脉力矩有滞后 $-2d < t < d$ 天的正相关，与阿特拉斯山脉力矩只存在同期相关。Czarnetzki^[28]也曾指出落基山山脉力矩、摩擦力矩与落基山东面的天气尺度气旋活动相关密切。

此外，山脉力矩（喜马拉雅山、落基山）的变化和ENSO及大气的低频振荡（AO、NAO、PNA）也有着密不可分的关系^[29-30]。

3 AAM的变化与ENSO等热带活动的联系

3.1 AAM的年（代）际变化与ENSO

实际大气的变化主要体现在相对AAM的变化上，对AAM的研究多涉及到相对AAM。20世纪80年代，人们开始注意到ENSO与AAM的密切联系。强的厄尔尼诺（1982—1993年，1997—1998年）发生

时，AAM和LOD均出现极大值^[31]。Stefanick^[11]在研究1963—1973年AAM的年际变化及南方涛动时指出，厄尔尼诺事件发生时，南方涛动指数（SOI）达到负的极大值，在西太平洋存在正的气压异常，东太平洋存在负的气压异常，从而导致正的向东的气压梯度异常，使得东风减弱，相对AAM增加。钱维宏等^[32]研究表明地气系统中的角动量交换是通过地气（或海气）界面上的摩擦力矩、山脉力矩来同ENSO相联系的，地球自转速率、赤道东太平洋海温、不同纬带及全球AAM之间存在着协同变化关系。Dickey等^[33]在分析1997—1998年强ENSO事件对地气系统角动量交换的影响时，指出相对AAM存在自赤道向高纬的向极传播现象，这种向极传播在低频（4.7a）和准两年（2.4a）周期上最为显著。del Rio等^[34]的研究也曾揭示，AAM准两年振荡（QBO）可分为平流层的向下传播和对流层的向上传播，当两种QBO信号处于同位相时，就会产生强的厄尔尼诺现象（比如1982—1983年，1997—1998年）。AAM 3~4年的周期振荡仅存在对流层自下而上的传播型，在这一时间尺度上，相对AAM不仅存在赤道的向极传播，还有极地的向赤道传播。相对AAM的向赤道传播对ENSO也有一定影响，比如在1982—1983年和1972—1973年的厄尔尼诺事件发生时，相对AAM出现向赤道传播。在年际变化上，相对AAM显著的向极传播与ENSO息息相关^[35]。Chen等^[36]探索了年际变化尺度上，引起相对AAM向极传播的原因。他指出ENSO冷位相期间，西风异常出现在热带或者较高纬度，全球相对AAM异常达到最小值；相反，ENSO暖事件期间，副热带地区出现西风异常，全球相对AAM异常达到最大值，角动量的向极传播就是由这种冷、暖事件过渡期间异常环流的突变所引起的。

Paek等^[37]借助于CMIP3和CMIP5模式分析了AAM（包括 M_{Ω} 和 M_r ）的百年际和多年代际变化趋势。他在研究中指出，AAM的变化趋势主要由相对AAM贡献，在20世纪和21世纪，AAM均存在显著增加趋势，但是21世纪的增加趋势明显强于20世纪，导致AAM增加的诱因是温室气体。在多年代际时间尺度上，相对AAM的变化趋势并不显著，由此，温室气体对AAM多年代际上的影响并不显著。del Rio等^[38]利用20世纪139年（1870—2008年）的再分析资料研究了AAM的长时间尺度（20a以上周期成分）的变化特征。他的研究表明1950—1985年期间全球AAM有增加趋势，20世纪80年代中期以后开始减弱。在年际至十年时间尺度上（25a以下），AAM与ENSO之间存在很高的

相关性,而在更长时间尺度上(30~50a,甚至80a以上),AAM可能对LOD的变化起一定作用。30~50a的时间尺度上,AAM与PDO同步变化,更长时间尺度上(80a以上)AAM滞后于PDO、ENSO。Yang等^[39]在对比研究全球、热带、副热带AAM的变化特征时,发现在AAM从热带向副热带传播的过程中存在一个2a左右的循环周期:当热带AAM增加时,在随后的10个月伴随副热带AAM亦增加;而当副热带AAM增加时,会伴随随后的4~14个月热带AAM的减少。这种AAM从热带到副热带的传播活动在ENSO事件发生时表现的尤为显著,比如1982—1983、1997—1998年的厄尔尼诺事件,对应强的热带AAM的向副热带传播。

3.2 AAM的季节内振荡与热带对流

全球AAM的季节内振荡主要通过两种方式来激发,一种是副热带山脉力矩,另一种是热带对流活动^[39]。Dickey等^[40]发现在40d左右时间尺度上,热带外AAM有向赤道传播的现象,并通过对比研究中纬度和热带AAM季节内振荡的可能的不同激发源,认为热带地区50d振荡与MJ波的对流驱动有关联,而热带外40d振荡与非纬向流和地形的相互作用有关。Marcus等^[41]也表示北半球热带外地区的AAM存在40d振荡,这种振荡由山脉力矩及其与纬向对称环流的相互作用所激发。AAM与热带地区40~50d振荡(MJO)活动的联系也很密切。20世纪80年代初期,Langley等^[12]就发现LOD和全球AAM均存在50d左右的振荡。Anderson等^[42]将这种AAM季节内尺度的变化与MJO联系起来,分析了纬向平均纬向风的向极和向下传播。他表示当纬向平均纬向风到达副热带时,全球AAM达到峰值。Madden^[43]的研究则表明当MJO对流异常减弱至日界线附近时,全球AAM增至最大值。Weickmann等^[44]运用全球尺度的风场和OLR资料研究了热带MJO中的AAM循环,指出AAM输送对AAM-MJO关系而言是很重要的,AAM-MJO联系的媒介在于热带对流加热所激发的行星罗斯贝波与环境气流纬向变化、山脉力矩的相互作用。Gutzler等^[45]普查了热带纬向风、总AAM、LOD及赤道附近海平面之间的关系,发现它们均存在季节内振荡。热带AAM和纬向平均 u 风与西太平洋(此处的MJO信号很强)对流层上层纬向风40~50d的振荡的关系很弱,但是与对流层低层的关系很强。与MJO相联系的太平洋表面风应力振荡是动量累积进入和耗散离开大气的主要媒介。

4 AAM与LOD的联系

LOD的长周期变化源自于潮汐能量耗散和核幔电磁耦合,而其年际时间尺度上(周年、半年及高频的

飞潮汐变化)可归因于地球、大气和海洋之间的角动量交换。LOD变化与AAM变化之间存在定量关系: $\Delta LOD = 1.68 \times 10^{-26} \Delta M^{[12]}$ 。

Rosen等^[46]基于1976—1981年纬向风资料,通过谱分析分析了相对AAM和观测的固体地球的旋转速率的时间序列,结果发现AAM和LOD均有明显的年循环及年以下信号,在周年及以下周期上,AAM在LOD的变化中起到很重要的驱动作用。彭公炳^[47]也表示地球自转角速度的季节变化与全球相对AAM以及两半球间的大气温差有密切联系,当两半球温差加大时,AAM减小,相应地地转角速度加快,反之亦然。郑大伟等^[48]分析LOD、赤道海温和AAM之间的相关关系时发现,AAM的年际变化超前于LOD和ENSO 2~3个月,由此他认为地球自转的年际变化和厄尔尼诺事件可能是固体地球和海洋各自对大气环流变异的响应。周永宏等^[49]运用小波转换等方法研究了1970年1月—1999年6月期间LOD变化序列、AAM和南方涛动指数的关系,结果表明LOD变化和AAM的年际变化与ENSO具有相似的时变谱结构,从LOD变化和AAM资料中可以检测到1997—1998年厄尔尼诺和1998—1999年拉尼娜事件的信号。Gross^[50]则认为在年代际或更长的时间尺度上,由于幔核角动量的交换逐渐占据主导地位,AAM与LOD之间的同时相关性逐渐消失。杨虎等^[51]将表征地球自转速度变化的日长(LOD)数据分解为多个尺度的波动,包括以13.6d、27.3d、0.5a、1a为周期的波动以及年际变化和年代际变化。通过对LOD与相对AAM的小波相干分析证明,地球自转速度变化中40d~5a周期(包括0.5a、1a、年际变化)的波动主要受AAM的变化激发,且二者在1~5a尺度的变化相位一致。Yang等^[39]研究指出相对AAM与LOD的关系存在多时间尺度变化特征。在去掉LOD线性趋势之前,全球和热带AAM与LOD的相关没有通过信度检验,而在去掉LOD趋势之后,全球和热带AAM与LOD表现出显著的正相关(相关系数分别为0.365、0.396),超过了95%的信度检验。这说明在短时间(年际)尺度上,AAM与LOD有显著正相关;但在长时间尺度上,二者不存在显著相关性;但在副热带具有不同的表现,去趋势之前相关显著,去趋势之后相关大大减少。

5 结束语

不难发现,在过去的几十年里,人们对AAM的应用研究越来越广泛,包括研究相对AAM及其输送、摩擦和山脉力矩的多时间尺度变化特征,并将这些变化与ENSO、QBO及地球日长等的变化联系起来,来揭示大气、海洋活动与固体地球之间的耦合过程,以期

望更好地理解地球动力学系统中角动量的交换过程。因此,对这一领域的研究具有很重要的科学意义和价值。

一方面,随着观测仪器、研究手段以及多学科交叉知识的不断发展,使AAM的应用研究得到广泛而深入的发展,已取得丰富的研究成果,主要有以下几方面进展:对地气系统角动量交换及角动量输送过程的理解已形成一个比较完整和系统性的理论框架:固体地球、大气和海洋作为一个封闭系统,其总的角动量守恒,当大气自西向东的角动量增加时,固体地球的角动量必然减小,反之亦然,这种交换过程通常是通过摩擦和山脉力矩来完成的;对AAM与ENSO联系的物理机制亦有较为统一的认识:通常来讲,在El Niño事件期间,中太平洋低纬地区的低层大气由向西流动转为向东运动,大气得到了与地球自转同向的角动量。同时,由于信风减弱,海洋上表面层洋流的自东向西运动也减弱,并且,随着时间的推移,洋流开始向东流动,太平洋中的洋流也得到了一个与地球自转方向一致的角动量。这样,大气和洋流获得角动量,固体地球则失去角动量,从而也导致了日长的增加;在AAM与地球自转变化之间的关系方面也已有突破性进展:在不同时间尺度上二者的因果关系存在较大差异,年际尺度上引起地球自转异常的激发源来自大气和海洋的作用,包括相对AAM的变化以及反映海气相互作用的ENSO,而长时间尺度上(年代际甚至更长)引起地球自转异常的激发源主要是核幔耦合机制。

另一方面,由于资料所限或其他原因,还有很多基本问题仍未解决,如:(1)对AAM的变化规律尤其是输送方面的研究还不够深入和系统,对其变化机理以及对大气环流异常的影响过程尚不十分清楚;

(2)对山脉和摩擦力矩精确地定量计算还存在一定的困难,这给地气系统角动量的交换和角动量输送过程的准确理解带来一定的局限性;(3)如何建立全球大气、海洋和固体地球耦合的综合模式,通过考虑山脉力矩和摩擦力矩的作用来揭示地球动力学系统中角动量交换的过程还不是很清楚;(4)从AAM的视角去分析气候异常和气候变化的研究工作依然亟待加强。这些因素均影响着对AAM更加全面而深入的认识,还需要通过更多深入和细致的研究来推动该领域的发展。

参考文献

- [1] Ferrel W. An essay on the Winds and the Currents of the Ocean. Nashville Journal of Medicine and Surgery, 1856, 11: 287-301. Reprinted in Popular essays on the movements of the atmosphere. Prof Pap Signal Serv, 1882, 12: 7-19.
- [2] Thomson J. Bakerian Lecture: On the Grand Currents of Atmospheric Circulation. Proceedings of the Royal Society of London, 1892, 51(308-314): 42-46.
- [3] Oberbeck A. über die Bewegungerscheinungen der Atmosphäre. Sita.-Ber. Akad. Wiss. Berlin, 1888(383-395): 1129-1138. English trans: Abbe C. The mechanics of the Earth's atmosphere. Washington: Smithsonian Inst, 1893.
- [4] Jeffreys H. On the dynamics of geostrophic winds. Quart J Roy Meteor Soc, 1926, 52: 85-104.
- [5] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法(第三版). 北京:气象出版社,2000.
- [6] 叶笃正,朱抱真. 大气环流的若干基本问题. 北京:科学出版社,1958.
- [7] 叶笃正,杨大升. 北半球大气中角动量的年变化和它的输送机构. 气象学报, 1955, 26(4): 281-294.
- [8] White R M. The role of mountains in the angular momentum balance of the atmosphere. J Meteo, 1949, 6(5): 353-355.
- [9] 洛伦茨, E N. 大气环流的性质和理论. 北京大学地球物理系气象专业译. 北京:科学出版社,1976.
- [10] Bjercknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. Tellus, 1966, 18(4): 820-829.
- [11] Stefanick M. Interannual atmospheric angular momentum variability 1963-1973 and the Southern Oscillation. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1982, 87(C1): 428-432.
- [12] Langley R B, King R W, Shapiro I I, et al. Atmospheric angular momentum and the length of day: A common fluctuation with a period near 50 days. Nature, 1981, 294(5843): 730-732.
- [13] Oort A H, Peixoto J P. Angular momentum and energy balance requirements from observations. Advances in Geophysics, 1983, 25: 355-490.
- [14] Starr V P. Note concerning the nature of the large-scale eddies in the atmosphere. Tellus, 1953, 5(4): 494-498.
- [15] 叶笃正,邓根云. 1950年平均经圈环流与角动量的平衡. 气象学报, 1956, 27(4): 307-321.
- [16] 吴国雄, Tibaldi S. 平均经圈环流在大气角动量和感热收支中的作用. 大气科学, 1988, 12(1): 8-17.
- [17] Feldstein S B. An observational study of the intraseasonal poleward propagation of zonal mean flow anomalies. J Atmos Sci, 1998, 55(15): 2516-2529.
- [18] James I N, Dodd J P. A mechanism for the low-frequency variability of the mid-latitude troposphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(533): 1197-1210.
- [19] Huang W R, Chen T C, Wang S Y. Co-variability of poleward propagating atmospheric energy with tropical and higher-latitude climate oscillations. Climate dynamics, 2012, 39(7-8): 1905-1912.
- [20] Oort A H, Bowman H D. Study of the mountain torque and its interannual variations in the Northern Hemisphere. J Atmos Sci, 1974, 31(8): 1974-1982.
- [21] Swinbank R. Global atmospheric angular momentum balance inferred from analyses made during the FGGE. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(470): 977-992.
- [22] Rosen R D, Salstein D A. An El Niño signal in atmospheric angular momentum and Earth rotation. Science, 1984, 225(4660): 411-414.
- [23] Newton C W. Global angular momentum balance: Earth torques and atmospheric fluxes. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, 28(8): 1329-1341.
- [24] Iskenderian H, Salstein D A. Regional sources of mountain torque variability and high-frequency fluctuations in atmospheric angular momentum. Mon Wea Rev, 1998, 126: 1681-1694.
- [25] Weickmann K M. Mountains, the global frictional torque, and the circulation over the Pacific-North American region. Mon Wea Rev, 2003, 131(1): 2608-2622.
- [26] 王亚非,魏东,李琰. 1998年5-6月区域大气角动量收支与东亚天气尺度系统变化. 高原气象, 2011, 30(5): 1189-1194.
- [27] Egger J, Hoinka K P. Mountain torques and synoptic systems in the Mediterranean. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 134(634): 1067-1081.
- [28] Czarnetzki A. Regional mountain torque estimate over the Rocky Mountains in lee cyclones. J Atmos Sci, 1997, 54(15): 1986-1997.

- [29] Wolf W L, Smith R B. Length-of-day changes and mountain torque during El Nino. *J Atmos Sci*, 1987, 44: 3656-3660.
- [30] Lott F. Mountain torques and Northern Hemisphere low-frequency variability. Part I: Hemispheric aspects. *J Atmos Sci*, 2004, 62(11): 1259-1271.
- [31] Chao B F. Interannual length-of-day variation with relation of southern oscillation/El Nino. *Geophys Res Lett*, 1984, 11: 541-544.
- [32] 钱维宏, 丑纪范. 地气角动量交换与 ENSO 循环. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(1): 80-86.
- [33] Dickey J O, Gegout P, Marcus S L. Earth-atmosphere angular momentum exchange and ENSO: The rotational signature of the 1997-98 Event. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(16): 2477-2480.
- [34] del Rio R A, Gambis D, Salstein D A. Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum. *Annales Geophysicae*, 2000, 18(3): 347-364.
- [35] Dickey J O, Marcus S L, Hide R. Global propagation of interannual fluctuations in atmospheric angular momentum. *Nature*, 1992, 357: 484-488.
- [36] Chen T C, Tribbia J J, Yen M C. Interannual variation of global atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1996, 53(19): 2852-2857.
- [37] Paek H, Huang H P. Centennial Trend and Decadal-to-Interdecadal Variability of Atmospheric Angular Momentum in CMIP3 and CMIP5 Simulations. *J Climate*, 2013, 26(11): 3846-3864.
- [38] del Rio R A, Gambis D, Salstein D. Interdecadal oscillations in Atmospheric Angular Momentum variations. *Journal of Geodetic Science*, 2012, 2(1): 42-52.
- [39] Yang P, Shi W J, Xiao Z N, et al. Spatial and temporal variation of atmospheric angular momentum and its relation to the earth length of day. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 28: 150-161.
- [40] Dickey J O, Ghil M, Marcus S L. Extratropical aspects of the 40-50 day oscillation in length-of-day and atmospheric angular momentum. *J Geophys Res*, 1991, 96(22): 643-658.
- [41] Marcus S L, Ghil M, Dickey J O. The extratropical 40-day oscillation in the UCLA general circulation model, II, Spatial structure. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 1993-2014.
- [42] Anderson J D, Rosen R D. The latitude-height structure of 40-50 day variations in atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 1584-1591.
- [43] Madden R A. Relationships between changes in the length of day and the 40- to 50-day oscillation in the tropics. *J Geophys Res*, 1987, 92: 8391-8399.
- [44] Weickmann K M, Khalsa S J S, Eischeid J. The atmospheric angular momentum cycle during the tropical Madden-Julian oscillation. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 2252-2263.
- [45] Gutzler D S, Ponte R M. Exchange of momentum among atmosphere, ocean, and solid earth associated with the Madden-Julian oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D11): 18679-18686.
- [46] Rosen R D, Salstein D A. Variations in atmospheric angular momentum on global and regional scales and the length of day. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C9): 5451-5470.
- [47] 彭公炳. 大气热力状况在地球自转速度季节变化中的作用. *天体物理学报*, 1983, 39(4): 303-311.
- [48] 郑大伟, 罗时芳, 宋国玄. 地球自转年际变化、El Niño事件和大气角动量. *中国科学(B 辑)*, 1988(3): 332-337.
- [49] 周永宏, 郑大伟, 廖新浩. 地球日长变化, 大气角动量和 ENSO: 1997-1998 厄尔尼诺和 1998-1999 拉尼娜信号. *测绘学报*, 2001, 30(4): 288-292.
- [50] Gross R S. Earth rotation variations-long period. *Treatise on Geophysics*, 2007, 3: 239-294.
- [51] 杨虎, 刘玉光, 张晓琳, 等. 地球自转速度变化的分解及其与 ENSO 的关系. *海洋环境科学*, 2013, 3(32): 424-427.

会议信息

- ◆ 卫星土壤湿度验证和应用学术会 (Satellite soil moisture validation & application workshop), 2014年7月10-11日, 阿姆斯特丹, 荷兰 (http://www.hydrology-amsterdam.nl/SoilMoistureWS_Adam14/Home.html)
- ◆ 第7届全球能量和水循环国际科学大会 (The 7th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle), 2014年7月14-17日, 海牙, 荷兰 (<http://gewex.org/2014conf/info.html>)
- ◆ 第7届青年学者地学会议 (VII GeoSymposium of Young Researchers), 2014年9月17-19日, 日维茨, 波兰 (<http://geosymp.wnoz.us.edu.pl/index.html>)
- ◆ EUMETSAT 气象卫星年会 (The annual EUMETSAT Meteorological Satellite Conference), 2014年9月22-26日, 日内瓦, 瑞士 (https://www.eumetsat.int/website/home/News/ConferencesandEvents/DAT_2076129.html)
- ◆ 气候研究和天基地球观测: 决策所需的气候信息 (Climate Research and Earth Observations from Space: Climate Information for Decision Making), 2014年10月13-17日, 达姆施塔特, 德国 (<https://www.eumetsat.int/>)
- ◆ 测高技术前沿 (New frontiers of altimetry), 2014年10月27-31日, 康斯坦茨湖, 德国 (<http://www.ostst-altimetry-2014.com/>)
- ◆ 第3届国际 ENSO 会议 (III International Conference on ENSO), 2014年11月12-14日, 瓜亚基尔, 厄瓜多尔 (<http://www.ciifen-int.org>)
- ◆ 第2届国际海洋研究大会 (2nd International Ocean Research Conference), 2014年11月17-21日, 巴塞罗那, 西班牙 (<http://www.iocunesco-oneplanetoneocean.fnob.org/>)
- ◆ 第7届 IPWG 会议 (7th IPWG Workshop), 2014年11月17-21日, 筑波, 日本 (<http://www.isac.cnr.it/~ipwg/meetings/tsukuba-2014/Tsukuba2014.html>)
- ◆ 联合国降低灾害风险世界大会 (UN World Conference on Disaster Risk Reduction), 2015年3月14-18日, 仙台, 日本 (<http://www.wcdrr.org/>)