

姚秀萍, 闫丽朱, 张硕, 2019. 大气非绝热加热作用的研究进展与展望[J]. 气象, 45(1): 1-16. Yao X P, Yan L Z, Zhang S, 2019. Research progresses and prospects of atmospheric diabatic heating[J]. Meteor Mon, 45(1): 1-16 (in Chinese).

大气非绝热加热作用的研究进展与展望^{*}

姚秀萍¹ 闫丽朱² 张 硕³

1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 成都信息工程大学, 成都 610225

提 要: 大气非绝热加热与天气系统的发生发展有密切联系, 与降水等天气过程密不可分, 非绝热加热在大气运动中有着至关重要的作用。对非绝热加热的研究和理解, 有助于改进数值预报模式, 增强数值天气预报模式的预报能力。本文系统梳理了大气非绝热加热的基本内容, 近几十年非绝热加热及其作用的研究成果, 主要包括非绝热加热的概念及其表征、非绝热加热的时空分布特征、非绝热加热与季风、天气系统(如西太平洋副热带高压、热带气旋、温带气旋和急流)和降水之间的关系, 以及非绝热加热在数值模式中的表征, 进而指出有待于进一步研究的方面。

关键词: 非绝热加热, 作用, 研究进展, 展望

中图分类号: P401, P432

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.001

Research Progresses and Prospects of Atmospheric Diabatic Heating

YAO Xiuping¹ YAN Lizhu² ZHANG Shuo³

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract: Diabatic heating is closely related to the occurrence and development of weather system and is closely related to weather processes such as precipitation. Diabatic heating plays an important role in atmospheric motion and has drawn more and more attention in recent years. Study and understanding of diabatic heating can help improve numerical weather forecasting model and enhance the forecasting ability of numerical weather forecasting model. This paper systematically analyzes the basic contents of diabatic heating and the research results of diabatic heating in recent decades, mainly including concept and characterization of diabatic heating, spatio-temporal distribution characteristics of diabatic heating, relationship between diabatic heating and monsoon, relationship between diabatic heating and weather systems such as subtropical high over western Pacific, tropical cyclone, temperate cyclone and jet streams, and relationship between diabatic heating and precipitation as well as the characterization of diabatic heating in the numerical model, etc. Then, we point out that diabatic heating should be further studied.

Key words: diabatic heating, effect, research progress, prospect

^{*} 国家自然科学基金项目(41475041, 91637105)和国家科技支撑项目(2015BAC03B06)共同资助

2018年3月23日收稿; 2018年9月24日收修定稿

第一作者: 姚秀萍, 主要从事天气动力学及中尺度气象学研究与教学. Email: yaoxp@cma.gov.cn

引 言

非绝热加热是大气运动的能量来源。非绝热加热存在于长波辐射、短波辐射、地气相互作用、大尺度抬升凝结以及云微物理过程等大气活动过程。非绝热加热产生的能量维持、调节着大气的宏观和微观过程,是推动大气环流系统和使天气系统发展的主要热力强迫因子(丁一汇,1989)。

我国东部邻海,西部有世界上海拔最高的青藏高原,海洋与陆地之间的热力差异,以及夏季高原的强大加热作用,与我国的天气气候有着密不可分的关系(黄荣辉,1985;钟珊珊等,2009;周胜男等,2015;李国平等,2016)。我国东部的降水为典型的季风降水,具有明显的季节特征,季风作为热力驱动的大尺度环流,非绝热加热在其中起着重要作用(刘向文等,2009)。非绝热加热可以通过影响副热带高压、热带气旋和高空急流等天气系统的变动(黄荣辉和李维京,1988;钱贞成和喻世华,1991;张韧等,1995;李崇银等,2004),进而对降水产生调控作用。短期天气预报和数值预报试验的研究结果表明,对于低空环流形势以及降水分布和降水量的预报,非绝热加热过程的影响是不可忽略的(钱永甫和沈金妹,1990)。许多灾害性天气过程,如暴雨、强对流通常是在大尺度条件影响下,主要由中小尺度天气系统造成,而中小尺度天气系统的发生发展受辐射传输过程、水汽相变过程、湍流对热量、动量和水汽的交换过程等非绝热物理过程影响很大(张大林,1998;陈静等,2006),同时中小尺度系统通过非绝热加热也会大尺度环境产生影响(丁一汇,2005)。因此,对非绝热加热的研究,有利于加深对天气过程的发生发展的认知,有助于进一步探究天气系统发生发展的物理机制,也有助于增强数值天气模式预报能力、提高天气预报准确率。

为此,在非绝热加热作用日益被关注的当今,有必要对非绝热加热作用的相关研究成果进行回顾,在重点梳理非绝热加热对大气环流、天气系统以及降水作用和影响的基础上,试图给出今后值得进一步研究的方面。同时需要说明的是,本文主要是从天气学角度对非绝热加热的作用进行回顾与总结。

1 非绝热加热的表征与计算

非绝热过程是指系统与外界之间的热量交换过

程,大气的非绝热加热包括辐射加热、感热加热和潜热加热过程。大气中的非绝热加热是维持大气环流和天气系统发展的主要热力强迫因子,非绝热加热(冷却)过程成为大气内能的源(汇)项,并在天气现象中起着决定性作用(丁一汇,1989;高丽,2006;高丽和李建平,2013)。

1.1 非绝热加热的观测

对地表和大气之间感热、潜热通量观测的主要方法有涡动相关(EC)方法、波文比能量平衡方法以及空气动力学方法等(郝小翠等,2015)。

其中,涡动相关法是目前最精确的通量观测方法(郝小翠等,2016),在对地表通量进行观测和分析中得到了普遍应用(王胜等,2005;张艳武等,2005;张宇等,2005)。该方法使用的观测仪器是涡动相关仪,其特点是单点观测,空间尺度较小,一般只有几十至几百米,数据的空间代表性有限(马迪等,2010;郝小翠等,2015;2016)。而近些年的新兴仪器大孔径闪烁仪(简称 LAS),具有观测尺度较大的特点,可以测量几百米到数千米甚至以上的路径平均感热通量,更适合于非均匀下垫面观测,具有广阔的应用前景(郝小翠等,2015;2016)。

对辐射通量的观测主要利用太阳辐射观测仪,测量包括直接辐射、散射辐射、地面向上短波辐射和地面太阳总辐射等(王振会,2011)。

1.2 非绝热加热的卫星反演法

气象卫星因其具有全天候观测、时空分布均匀、覆盖率广和分辨率高等优势,在气象研究中得到日益广泛的应用(韩存博等,2014)。卫星对非绝热加热数据的反演,也越来越受到关注。

利用卫星上的传感器可以得到多种辐射资料,例如直接太阳辐射通量、地球和大气反射的短波太阳辐射,以及地球和大气的放射长波辐射等数据。

目前利用卫星资料反演感热通量和潜热通量有两个主要方法:物理模式法和经验方法(王开存等,2005)。物理模式法包括梯度模式和热惯量模式两大类。梯度模式是结合了地表气象资料与卫星遥感资料,利用地表温度与气温之差计算感热通量,利用余项法计算潜热通量。热惯量方法利用地表对吸收辐射的响应计算热通量。经验方法是利用已知的地基通量观测拟合其与遥感参数的关系,来计算区域平均的热通量(王开存等,2005)。

1.3 非绝热加热的正算法

正算法也称直接算法,是通过参数化方案或者结合经验公式分别计算出各个分量,然后相加求和。其优点是算法简单,能够根据非绝热加热的各个分量,直接求和。

非绝热加热的强度一般用非绝热加热率 Q (单位: $K \cdot d^{-1}$) 来表征, Q 由三项组成: 潜热加热率 H_c 、感热加热率 H_s 、辐射加热率 H_r , 即

$$Q = H_c + H_s + H_r$$

潜热加热、感热加热以及辐射加热通常以通量的形式表征, 热通量的单位为 $W \cdot m^{-2}$, 热通量和加热率之间可以通过一定的计算进行转换, 以下将简要介绍非绝热加热各个分量的计算方法(丁一汇, 1989)。

1.3.1 潜热加热计算

潜热是指在等温等压情况下, 物质从一个相态变化为另一个相态所吸收或放出的热量。潜热加热的计算可分为大尺度潜热加热 H_{cs} 和对流潜热加热 H_{cc} 两部分。

大尺度潜热加热是指稳定的饱和空气在上升时, 会有大尺度凝结发生, 释放潜热, 较为精确的大尺度加热率为:

$$H_{cs} = -\frac{1}{c_p} L \omega \frac{\partial q_s}{\partial p}$$

式中, c_p 是定压比热, L 是凝结潜热, ω 是 p 坐标系的垂直速度, $\frac{\partial q_s}{\partial p}$ 代表一条局地湿绝热线上饱和比湿的垂直梯度。

对流加热是由中小尺度积云活动造成的, 其主要的计算方法是积云参数化方法, 包含郭晓岚方案、对流调整方案和荒川-舒贝特方案。其中郭晓岚的对流加热方案(Kuo, 1974)应用较多, 主要是利用大尺度参数计算出模式云与其所在环境的温度差和湿度差, 以得到积云对流的加热和增湿量。

1.3.2 感热加热计算

感热指物体在加热或冷却过程中, 温度升高或降低而不改变其原有相态所吸收或放出的热量。地表面的感热通量可用总体空气动力公式计算:

$$F_0 = C_D \rho_s C_D (T_s - T_a) |\mathbf{V}_s|$$

式中, F_0 是地面感热通量, C_D 是阻力系数, ρ_s 是地面的空气密度, T_s 和 T_a 分别是地表温度(或海面温度)和近地面气温, $|\mathbf{V}_s|$ 是地表附近或洋面附近的风

矢量。

为了得到 H_s , 需要求出感热通量的垂直导数。这要知道感热通量随高度的分布, 通常设 850 hPa 或边界层顶高度感热通量为 0, 其间呈线性分布, 则

$$H_s = \frac{gF_0}{P_s - 850}$$

其中 P_s 是地面气压。

1.3.3 辐射加热计算

大气中的辐射加热是净短波辐射和净长波辐射加热的总和。大气的辐射加热包括大气吸收的太阳短波辐射 R_{cs} 、来自地表的长波辐射通量 R_{cl} 和大气向外的长波辐射通量 R_{cl} , 则大气辐射加热通量 R 为(李文卓, 2016):

$$R = R_{cs} + R_{cl} - R_{cl}$$

1.4 非绝热加热的倒算法

倒算法最早由 Yanai et al(1992) 提出, 是根据热力学量的变化利用热力学方程倒算出非绝热加热。倒算法的优点是引入计算的物理量经过了再分析资料同化系统同化, 满足了大气能量和物质平衡原理, 所依赖的温压湿风等气象资料一定程度上经过了实测资料的同化, 因而包含着与再分析资料正算法输出的加热场资料不同的信息。为了方便考虑, 目前很多研究都会采用倒算法(王黎娟等, 2005; 巩远发等, 2007; 姚秀萍和孙建元, 2013; 徐祥德等, 2014; Yao and Sun, 2016) 计算视热源 Q_1 :

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \left(\frac{P}{P_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right]$$

对整层大气积分后得到:

$$\langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} Q_1 dp = c_p \int_{p_1}^{p_2} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \left(\frac{P}{P_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] dp$$

式中, c_p 为定压比热, $k = R/c_p$, 一般取常数 0.286, \mathbf{v} 为水平风矢量, $P_0 = 1000$ hPa。公式右边三项分别为温度局地变化项、水平温度平流项及温度垂直输送项, 利用上式对 Q_1 的计算即为倒算法。视热源 Q_1 表示单位时间内单位质量大气的加热程度, Q 与 Q_1 的关系为 $Q = Q_1/c_p$ 。当 $Q > 0$ 时为非绝热加热, 当 $Q < 0$ 时为非绝热冷却。

综上所述, 非绝热加热主要包含了潜热加热、感热加热和辐射加热三部分, 其量值可以通过地面仪器直接观测、卫星反演得到, 可以由正算法和倒算法获得, 倒算法是目前计算非绝热加热最为通用的方

法,同时数值天气模式中也可以直接输出非绝热加热相关物理量。

2 非绝热加热的分布特征

2.1 非绝热加热的全球分布特征

大气中的非绝热加热构成了全球大气的热源。夏季大气热源大值区位于亚洲热带季风辐合带,印度西海岸、青藏高原、西太平洋、孟加拉湾和南海东部均为强热源区,其中孟加拉湾和南海东部热源中心最强;南半球低纬及赤道附近为东西向的冷源区,非洲东海岸和澳大利亚为冷源区(朱乾根等,2007)。

全球大气热源的性质如果一年内不发生改变,则称之为永久热源中心。全球的永久热源中心主要分布在赤道附近地区,主要位于赤道非洲的西部、苏门答腊岛西边的海域、赤道中西太平洋地区和日本群岛以东的太平洋上(蓝光东等,2005)。

非绝热加热中心随季节有经向和纬向的迁移(Wei et al,1983;Schaack et al,1990)。全球的大气热源在夏季范围最大,强度最强;从秋季开始到冬季,其位置逐渐南移,范围逐渐变小,强度逐渐减弱;到下一年春季主要热源区域又开始北进,范围增大,强度变强(张艳焕,2004;于群等,2007;张灵玲等,2012)。

2.2 亚洲季风区内非绝热加热分布特征

亚洲地区是世界上最著名的季风区,我国大部分地区都受季风影响。从气候平均看,亚洲季风区内的南亚到西太平洋热带地区是全球范围最大的大气热源区(陈玉英等,2008)。

在亚洲季风区内,热源和热汇的季节差异明显。在夏季季风区内,热源区主要分布在大陆上,同时还分布在热带辐合带内,而海洋则表现为冷源区(王谦谦和葛朝霞,1992;钱永甫和王谦谦,1993)。具体来说,从青藏高原南侧到中国东部和南海地区,夏季是强的热源区,冬季则为较强的热汇;而在北太平洋中纬度和澳大利亚北部洋面上,夏季是弱的热源或热汇,冬季是强热源区(陈玉英等,2008)。

在亚洲季风区内,热源对亚洲夏季风形成与维持起着重要作用(黄荣辉和严邦良,1987;沈如金和纪立人,1990),同时还影响着大气活动中心变化和水汽交换等(简茂球等,2004;王黎娟等,2005;陈哲

和李崇银,2006)。因此,对季风区内大气热源汇的分布及变化特征研究,是理解大气环流和天气气候演变规律的基础。

另外,非绝热加热是如何影响东亚季风的形成和变动、如何影响天气系统的变化,将在下文进行介绍。

2.3 青藏高原上非绝热加热分布特征

青藏高原位于副热带欧亚大陆的中东部,是世界上海拔最高、地形最复杂的高原,它的热力效应对东亚地区乃至北半球的大气环流系统、气候的演变有着显著的影响。

青藏高原大气热源最突出的一个特征是夏季高原为热源,冬季高原为热汇(朱乾根等,2007)。巢纪平(1956)和叶笃正等(1957)最早研究了高原大气热源,他们首次计算了对流层中下层青藏高原大气热源,得到了这个重要结果。高原东部和西部的非绝热加热类型也不同,叶笃正等(1957)认为高原西部以感热加热为主,而东部以潜热加热为主,整个高原平均仍以感热加热为主。后来有许多气象学家也验证了这个结论(Luo and Yanai,1984;赵平和陈隆勋,2001;Ueda et al,2003),高原西部以感热为主,而高原东部潜热更为重要,不过从全年来看,以湍流感热输送最大,有效辐射次之,蒸发最小。

高原热源的另一个突出特征是存在周期性振荡(黄小梅等,2014)。全区有显著的2~3 a和6~8 a周期,而高原东部仅存在6~8 a周期,高原西部仅有2~3 a周期。近年来高原全区和东部大气热源具有明显增强趋势,而高原西部却为减弱趋势。

总之,从全球大气来看,大气的非绝热加热热源主要位于热带和副热带地区,非绝热加热具有明显的季节变化。在东亚地区,大气热源存在显著的低频振荡特征。夏季青藏高原是东亚的一个重要的热源中心,它对天气气候的演变有着显著的影响。

3 非绝热加热与东亚季风的关系

季风是指近地面层冬、夏盛行风向接近相反且气候特征明显不同的现象,有不少学者研究过东亚季风与非绝热加热之间的关系(叶笃正等,1957;Flohn,1960;李俊等,1985;冯志强等,1994;吴国雄等,2002;2005),本文重点梳理非绝热加热对东亚季风形成的作用和对季风强度的影响。

3.1 非绝热加热对东亚季风形成的作用

影响季风形成的基本因子是下垫面附近的热力因子,在季风形成的物理原因和机制方面,均与非绝热加热有关(金琼,2011):

一是太阳辐射的年变化引起了大气环流的季节变化。太阳辐射加热下垫面,再由下垫面通过地气感热交换、潜热交换及长波辐射加热大气。由于太阳辐射存在季节变化导致冬、夏盛行风向接近反向,即形成季风。二是海陆分布和地形分布造成的地表非均匀性。由于海陆热力差异形成了海陆季风,夏季大陆为热源,海洋为冷源,盛行海风;冬季大陆为冷源,海洋为热源,盛行陆风。地形的分布不均,最突出的表现是青藏高原与周围大气之间的热力性质不同,从而形成了高原上的冬、夏季风。三是大气在相变过程产生的凝结潜热释放。大量研究表明(Webster,1977;1981;吴国雄和刘还珠,1999;Liu et al,2001),大气相变过程在季风的形成中也起着重要作用,尤其是夏季风通常伴随着大范围的对流降水以及强大的凝结潜热释放。凝结潜热释放一方面可以通过垂直对流运动加热中高层大气,增强海陆温差,推进季风环流加强;另一方面,相变过程能够储存和再分配热带与副热带接收到的太阳辐射,并在特定区域释放,从而使得雨带的位置和强度发生改变。

因此,东亚季风环流的维持就是在全局各种动力热力因子下,大气环流变化的结果(朱乾根等,2007)。

3.2 非绝热加热对东亚季风强度的作用

非绝热加热对东亚季风强度的变化有调控作用。

林贤超和徐淑英(1989)提出了海洋的非绝热加热变化影响季风强弱进而影响我国降水的可能机制。当赤道东太平洋海温增暖时,可使海平面气压降低,澳大利亚高压增强,导致沃克环流减弱,西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)加强,并北抬西伸,引起季风环流加强,东亚中纬度西风带也加强,此时夏季风处于强盛阶段,因而出现初夏华北降水增多、江南降水减少的情形。反之,当海面温度降低时,沃克环流增强,夏季风变弱,导致华北降水减少、江南降水增多。

一些学者利用多年资料证明了非绝热加热与东

亚季风强度存在相关性。刘鹏等(2011)通过对多年强弱季风年潜热通量和感热通量的合成分析发现,南海夏季风的强年和弱年,前期冬季的感热和潜热空间距平的空间分布有明显差异。许田田等(2016)采用统计方法对 64 年的再分析资料进行计算,发现东亚夏季风偏强时,孟加拉湾、华南、南海及热带西太平洋大气热源异常偏强,印度东部、青藏高原、中南半岛及中纬度西太平洋地区大气热源异常偏弱。

可见,通过太阳辐射、海陆和地形分布造成的热力差异,以及大气的相变过程产生的凝结潜热释放,可以激发东亚季风的形成,也对东亚季风的强度产生了影响。

4 非绝热加热与天气系统的关系

4.1 非绝热加热与西太副高的关系

4.1.1 非绝热加热对西太副高形成的作用

经典理论曾认为,副高是经圈环流下沉在副热带地区低层辐散所致,但通过气象学者大量的研究表明,经典的副高形成理论是不准确的,至少没有揭示副高形成的本质(刘屹岷,1998)。实际上,副高形成和变化是大气运动受到内外强迫的综合结果(刘屹岷和吴国雄,2000;刘屹岷等,1999a)。自 1996 年以来,吴国雄、刘屹岷等开展了对副高形成机制系统性的研究,从理论分析和模拟上证明地球自转和非绝热加热才是夏季副高形成的主要原因,并揭示了感热、对流加热和长波辐射在副高形成中的不同作用(Rodwell and Hoskins,1996;刘屹岷,1998;董步文和丑纪范,1988;吴国雄等,1999;刘屹岷等,1999b)。

凝结潜热释放是决定东半球夏季副高位置和强度的关键因子。东亚季风降雨产生的凝结潜热使高层南亚高压位于凝结潜热加热中心西侧,中层西太副高位于加热中心东侧。通过定常波的传播,使得副热带地区的凝结潜热释放加热对中高纬地区天气的形成和维持有一定影响(Rodwell and Hoskins,1996)。

陆面感热加热是形成太平洋、大西洋低层副高及北美、北非中层副高的关键因子,凝结潜热加热对其位置和强度有所影响;西太副高的形成主要是由于季风降水产生凝结潜热的作用所致,表面感热作用较弱(Rodwell and Hoskins,1996;刘屹岷,

1998)。总之,空间非均匀非绝热加热是决定副高位置和强度的关键因素(Rodwell and Hoskins, 1996; 刘屹岷, 1998; 董步文和丑纪范, 1988; 吴国雄等, 1999; 刘屹岷等, 1999b)。

4.1.2 非绝热加热对西太副高变动的的作用

多项研究表明(黄荣辉和李维京, 1988; 蒋全荣等, 1997; 陈月娟等, 2001), 非绝热加热的不均匀分布, 对西太副高的南北摆动和东西进退有重要影响。

通过对 1998 年 6 月西太副高位置变动与大气热源关系的研究, 发现副热带地区的非绝热加热对副高位置变化有很重要的作用(王黎娟等, 2005)。进一步研究表明(王黎娟等, 2009a; 陈璇等, 2011), 西太副高西伸都伴随着其西侧加热的显著增强, 并且加热增强先于西太副高西伸。

梅雨期间, 东风带扰动附近非绝热效应分布和强度的变化, 会影响西太副高东西向的运动(姚秀萍和孙建元, 2013; 孙建元等, 2013; Yao and Sun, 2016)。华南暴雨期间, 副高西北侧边缘的华南地区加热场可迫使副高在短期内东撤南退; 江淮暴雨期间, 副高北侧江淮流域加热场的存在不利于副高北进, 而西侧较远处孟加拉湾热源会诱导副高西伸(王黎娟等, 2009b)。因此副高位置的短期变异与非绝热加热场及其配置有密切联系。

除了从降水凝结释放的潜热加热来研究潜热对西太副高的作用, 还有一些研究从地面潜热通量的作用考虑。严蜜等(2011)发现地表热通量(包括潜热通量与感热通量)与西太副高强度的关系较为密切, 不受各自年代际变化的影响, 地表热通量的年代际变化引起了西太副高强度的变化。

4.2 非绝热加热与热带气旋的关系

热带气旋是由热带扰动发展起来, 经常在热带洋面上生成。由凝结潜热加热作用引起的垂直运动基本上决定了整个热带气旋垂直运动的分布, 与实际降水分布配合很好(沈如金和张宝严, 1982)。而热带气旋形成的重要理论——第二类条件不稳定理论(CISK), 就反映了非绝热加热与热带气旋的密切关系。

CISK 是指在热带条件不稳定的大气中, 当低层具有天气尺度的扰动时, 不稳定能量就会释放, 转变为热带气旋发展的动能。其具体过程是(朱乾根等, 2007), 积云对流释放凝结潜热加热对层中上层, 并使得高层气压升高, 产生辐散。高层辐散促进

了低层扰动中心的气压降低, 产生辐合。大尺度的低层辐合又为积云对流的发展提供了水汽。如此循环促使扰动不断发展形成台风。这种由积云对流和天气尺度扰动二者相互作用产生的不稳定性, 即为 CISK 机制。

一些研究结果证实了非绝热加热对热带气旋的结构与移动有密切关系。例如雷小途(1998)利用含非绝热加热强迫的正压涡度方程研究得出, 非绝热加热是热带气旋非对称结构形成的一种可能机制。袁佳双和寿绍文(2002)在研究一次江南暴雨的个例中发现, 低层 850 hPa 附近最大加热层的出现, 导致其下正的位涡扰动的出现, 有利于气旋的发生。而贺海晏(1995)则研究过非绝热加热与台风移动之间的关系, 结论是非轴对称的非绝热引导作用可使台风加速、减速或转向。

可见, 非绝热加热与热带气旋的关系密切, 影响着热带气旋发生、发展和移动。

4.3 非绝热加热与温带气旋的关系

4.3.1 非绝热加热与江淮气旋

江淮气旋是位于长江中下游、淮河流域的温带气旋, 它是影响长江中下游地区和江淮流域的重要天气系统(张晓红等, 2016)。江淮气旋生成后经常东移入海, 由于海面的摩擦系数较小, 水汽供应充足, 海洋可以提供大量的水汽潜热和感热, 使得入海后的江淮气旋可以强烈发展(陈璇等, 2011)。大量研究都证明非绝热加热与江淮气旋的发展有密切关系(李柏等, 2002; Ahmadi-Givi et al, 2004; 李斌等, 2009; 赵兵科, 2010)。

Danard(1964)曾强调了潜热加热对温带气旋发展的重要性。盛华和陶诗言(1991)认为非绝热加热对江淮气旋的发展起着促进作用。而仪清菊和丁一汇(1996)指出, 潜热加热、斜压不稳定、温度平流以及与急流有关的非地转加热等物理因子对爆发性气旋起重要作用。项素清(2008)的研究表明, 潜热释放是引起气旋入海后发展的最重要原因。王坚红等(2015)和牛丹(2015)对气旋入海发展机制的研究表明, 气旋中凝结潜热释放对暖季气旋起重要作用, 并与气旋深厚程度成正比; 下垫面非绝热加热对冬季和初春气旋作用显著, 对暖季气旋影响不明显。

4.3.2 非绝热加热与东北冷涡

东北冷涡是指在我国东北地区具有一定强度, 能维持 3~4 d, 且有深厚冷空气的气旋性涡旋。东

北冷涡通常出现在对流层中上部,能够满足无摩擦假设,所以其消过程必然与自由大气的非绝热加热相联系(李永生等,2016)。

李永生等(2016)通过合成分析证明了大气非绝热加热对东北冷涡的演变具有重要影响:在东北冷涡形成前,其高层的非绝热加热存在明显加强特征;东北冷涡形成后,在对流层中低层非绝热加热迅速发展。东亚中纬度地区对流层高层非绝热加热是东北冷涡形成和发展的重要原因,而对流层中低层的非绝热加热则是东北冷涡减弱消亡的主要原因。

4.4 非绝热加热与急流的关系

4.4.1 非绝热加热与高空急流

东亚夏季西风急流处于对流层上层,是影响东亚天气气候的重要环流系统,其季节性北跳是大气环流季节性转换的标志,是东亚地区自然季节划分的重要依据(叶笃正等,1958)。由于高空急流与大尺度环流系统密切联系,而大尺度环流系统中包含了直接热力环流,因此有不少学者研究了热力作用与高空西风急流之间的关系。

高空急流的变化与地面的加热存在联系。Krishnamurti(1979)发现 3 个热带加热中心和冬季北半球 3 个西风急流中心有明显联系。Yang and Webster (1990)等进一步研究发现,夏季热带地区的对流加热可以影响另一个半球冬季急流的位置和强度变化。董敏等(1999;2001)研究发现,西风急流中心的季节变化和热带加热场的季节变化紧密联系在一起。同时,太平洋海表温度异常、青藏高原积雪等外强迫对东亚高空急流变化也有重要作用(陈海山等,2003;廖清海等,2004;黄兴春和江静,2008;申乐琳等,2009;邱斌等,2013)。随后一些研究证明了,非绝热加热是导致高空急流位置突变的原因(李崇银等,2004;况雪源和张耀存,2006)。

由此可见,西风急流的位置和强度与非绝热加热之间的关系密不可分。

4.4.2 非绝热加热与低空急流

低空急流是在 600 hPa 以下出现的强而窄的气流,它是水平动量集中的气流带,具有强大的水平风速切变和垂直风速切变(朱乾根等,2007)。

关于低空急流的形成,一种理论认为(徐文金和刘聪,1985)对流凝结加热是暴雨过程中低空急流形成的重要原因之一。暴雨释放出的大量凝结潜热会增加有效位能,促进扰动发展。在不稳定层结大气

中,由于水汽凝结潜热加热造成特定风场和垂直环流间相互促进发展,两者相互的正反馈过程促使水平风场加强,促进低空急流形成和发展。在扰动场的作用下,大气层结越不稳定,水汽凝结加热作用越强,形成的低空急流的强度也越强(江敦春和韦统健,1983)。

还有一些研究证明,低空急流的形成与地形热力作用有关(Stensrud,1996;赛瀚和苗峻峰,2012a;2012b;赛瀚,2012)。由于昼夜辐射差异所导致的山脉及山谷上空气温的日间变化,以及由此所引起的位势高度场改变而产生的上山、下山气流是诱发低空急流形成的重要原因(Holton,1967;Jiang et al,2007)。与此同时,昼夜温度差异所导致的热成风转向也与上述过程一起对低空急流的发展与消亡起到了显著的促进作用(Bonner and Paegle,1970)。

因此在实际大气状况下,低空急流的形成是动力、热力和非地转运动等几种因子综合作用的结果。

可见,非绝热加热与天气系统间关系密切,对天气系统的影响主要有两点:一是非绝热加热会促进天气系统的形成,如西太副高、热带气旋和高低空急流;二是非绝热加热的分布会影响天气系统的变动和生消发展,例如温带气旋与东北冷涡。

5 非绝热加热与降水的关系

5.1 非绝热加热对降水的影响

一次降水过程的发生,主要是受高低空不同天气系统配置的综合影响,当天气系统的位置和强度发生变动时,势必会影响降水的发生地点、强度和持续时间。由于非绝热加热是影响大气环流和副高等天气系统的重要因子,则由天气系统造成的降水过程,就与非绝热加热之间存在密不可分的关系。

研究表明(陶诗言,1980;Ding,1992;施能等,1996;赵思雄等,2018),暴雨与大尺度环流和东亚夏季风异常活动有关,与中低纬天气系统联系紧密,特别是与西太副高之间存在着相互作用与制约的关系(吴国雄等,2003;冯文等,2015)。西太副高向西南异常延伸是造成长江中下游夏季异常降水的原因之一,而西太副高向西北异常延伸是造成淮河流域夏季异常降水的原因之一(Zhou and Yu,2005)。

青藏高原的热源强迫也是同样的原理,高原热

源有利于对流层低层气旋环流或低涡的生成、发展,也有利于季风环流增强,是造成青藏高原及周围地区以及高原东侧大范围降水变化的原因(华明,2003)。当高原夏季热源加强时,西太副高和南亚高压脊线位置偏南,东亚夏季风偏弱,从而会出现有利于西南地区东部夏季降水偏多的环流形势(李永华等,2011;余莲和封彩云,2012;黄青兰等,2017)。

5.2 降水对非绝热加热的反馈作用

非绝热加热与降水的关系密切,不仅非绝热加热作用会影响降水,反过来降水对非绝热加热也存在正反馈作用。个例研究和合成分析均能表明,在降水发生时非绝热加热效应与强降水区域有很好的对应关系,强降水过程会释放凝结潜热构成大气非绝热加热的主要部分。

丁一汇和王笑芳(1988)指出梅雨期的热源主要来源于降水产生的凝结潜热,暴雨期间降水释放的潜热造成了大气的净加热(陆尔等,1997),暴雨强度与大气非绝热加热的高值区相对应(桂海林等,2010),垂直输送项在大气非绝热加热中是最主要的加热项(周兵等,2001)。合成分析也表明,在江淮流域强降水发生时视热源 Q_1 的大值区与降水的分布非常一致,强降水过程所释放凝结潜热构成了大气非绝热加热的主要部分(王黎娟等,2011)。

因此,天气系统引起降水产生,凝结潜热释放,成为大气非绝热加热的主要组成部分;反过来当降水发生后,非绝热加热又存在正反馈作用,对降水天气系统维持产生影响,“天气系统”在“非绝热加热”和“降水”之间扮演了一个纽带作用。

6 非绝热加热在数值天气预报模式中的表征

数值预报近年来发展迅速,已成为暴雨预报的主要工具之一(崔波等,1999)。暴雨数值预报水平的提高有赖于各种非绝热物理过程在模式中的广泛应用(陈静等,2003),模式中几个典型的非绝热物理过程参数化方案有积云对流参数化方案、行星边界层方案和辐射方案等。

对于降水的模拟,模式中的云微物理方案和积云对流方案影响比较大,即湿物理过程起着重要作用(张大林,1998)。云微物理过程主要是在降水发生后,通过感热、潜热和动量输送等方式反馈影响大

尺度环流,同时影响着大气温度场和湿度场的垂直结构(陈德辉,2004;徐之骁,2015;徐之骁和徐海明,2016)。积云对过程会引起水汽和热量的垂直输送,积云对流参数化的主要作用就是估计次网格尺度上的对流降雨量及网格尺度上由对流造成的热量、湿度和动量的变化(赵鸣,2000;邓华,2007;邓华等,2008;伍华平等,2009)。还有一个与降水预报关系密切的物理参数化方案是边界层参数化方案,大气边界层中的动力过程是陆气相互作用的关键环节,它影响着地表和自由大气之间热量和水汽的交换,进而对天气和气候变化产生极大的影响(Benjamin and Carlson,1986)。多项研究表明,边界层中的湍流交换对于暴雨的发生、发展、消亡有着十分重要的影响(Braun and Tao,2000;Jankov et al,2005;周彦均,2015)。

不同的参数化方案对降水的模拟结果有很大影响,许多学者就不同的物理过程参数化方案展开了对比试验,结果表明,不同方案组合对不同个例、不同降水量级的模拟各有优势,但没有一种方案组合明显具有优势(Rajeevan et al,2010;廖镜彪等,2012)。因此,如何将非绝热作用更好地融入数值预报方案里,还有不少工作要做。非绝热参数化方案是影响降水模拟的敏感因子,不可能有一套参数化方案同时适合于所有的天气过程;并且随着模式中次网格物理过程不断参数化,不同的参数化方案组合对一次降水过程的模拟,其结果也不尽相同。仍需要做更多的降水模拟试验,来总结出针对不同区域、不同季节、不同性质的降水,哪种参数化方案最适合?这可能是未来研究的一个重点方面。

7 展望

通过以上回顾,总结出了非绝热加热作用在一些方面已经取得的研究成果。还有如下方面可能是今后值得进一步研究的内容。

(1) 在进行非绝热加热的研究时,资料是关键问题。目前新一代静止轨道定量遥感气象卫星——风云四号卫星(FY-4)已经发射,其连续、稳定运行将会让我们获得更高质量的卫星遥感数据,这有助于非绝热加热相关问题的进一步研究。如何应用其中的干涉式大气垂直探测仪资料,如何将不同探测来源得到的多元资料融合,进而得到可靠的非绝热加热资料,是值得进一步加强研究的方面。

(2) 关于非绝热加热的计算问题,还需要更加精确。尤其是青藏高原地区的非绝热加热意义重大,对其的精确计算是定量研究非绝热加热作用,尤其是推进非绝热加热成果应用的重要基础。

(3) 关于非绝热加热对天气系统及降水的反馈影响,现在的研究成果只有初步的定性结论,而更有实际意义的定量关系还没有明确。大部分研究利用了合成分析的方法,仅仅总结了非绝热加热对降水位置与强弱的大致影响,尚未给出对降雨强度的定量影响。同时,天气尺度系统附近的非绝热加热是如何具体影响一次降水过程的精细过程也值得进一步研究。

(4) 数值模式是当今的发展趋势,因为其包含了多种非绝热参数化方案,对各种非绝热过程的刻画如果能够更加完善和全面,必将有助于对非绝热过程及其作用认识。但是,如何更好地将非绝热加热融入中小尺度数值天气预报模式中去,是值得进一步探讨的内容。

值得说明的是,本文尝试对非绝热加热的相关研究进展进行梳理与总结,但其中涉及到的文献,是该方面的主要文献,无法做到全面,遗漏难免,欢迎各位读者一起探讨交流。

参考文献

- 巢纪平,1956. 从冬季东亚常定流型计算冷热源分布的初步研究[J]. 气象学报,27(3):167-179. Chao J P,1956. Preliminary study on the calculation of the distribution of cold and heat sources from the East Asian constant flow pattern in winter[J]. Acta Meteor Sinica,27(3):167-179(in Chinese).
- 陈德辉,2004. CAMS 大气数值预报模式系统研究[M]. 北京:气象出版社. Chen D H,2004. Research on CAMS Atmospheric Numerical Prediction Model System[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 陈海山,孙照渤,朱伟军,2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 II. 数值模拟[J]. 大气科学,27(5):847-860. Chen H S,Sun Z B,Zhu W J,2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation Part II. model simulation[J]. Chinese J Atmos Sci,27(5):847-860(in Chinese).
- 陈静,矫梅燕,龚建东,等,2006. 非绝热物理过程对北京暴雨数值预报不确定性影响[J]. 应用气象学报,17(S1):18-27. Chen J,Jiao M Y,Gong J D,et al,2006. The impact of diabatic physics on the uncertainty of heavy rainfall ensemble simulations in Beijing [J]. J Appl Meteor Sci,17(S1):18-27(in Chinese).
- 陈静,薛纪善,颜宏,2003. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J]. 气象学报,61(2):203-218. Chen J,Xue J S,Yan H,2003. The impact of parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation[J]. Acta Meteor Sinica,61(2):203-218(in Chinese).
- 陈璇,王黎娟,管兆勇,等,2011. 大气加热场影响西太平洋副热带高压短期位置变化的数值模拟[J]. 大气科学学报,34(1):99-108. Chen X,Wang L J,Guan Z Y,et al,2011. Simulation of effect of atmospheric heating field on short term position variation of the western Pacific subtropical high[J]. Trans Atmos Sci,34(1):99-108(in Chinese).
- 陈玉英,巩远发,魏娜,2008. 亚洲季风区大气热源汇的气候特征[J]. 气象科学,28(3):251-257. Chen Y Y,Gong Y F,Wei N,2008. The climatic characteristics of atmospheric heat sources sinks over the Asian monsoon region[J]. Scientia Meteor Sinica,28(3):251-257(in Chinese).
- 陈月娟,张弘,周任君,等,2001. 西太平洋副热带高压的强度和位置与亚洲地表温度之关系[J]. 大气科学,25(4):515-522. Chen Y J,Zhang H,Zhou R J,et al,2001. Relationship between the ground surface temperature in Asia and the intensity and location of subtropical high in the Western Pacific[J]. Chinese J Atmos Sci,25(4):515-522(in Chinese).
- 陈哲,李崇银,2006. 亚洲夏季风爆发与热源强迫下的热带大气 Rossby 波[J]. 大气科学,30(6):1227-1235. Chen Z,Li C Y,2006. Asian summer monsoon onset and tropical atmosphere Rossby wave forced by the heating source[J]. Chinese J Atmos Sci,30(6):1227-1235(in Chinese).
- 崔波,王建捷,郭肖容,1999. MM5 在国家气象中心 CRAY-C92 的实时预报试验尝试[J]. 应用气象学报,10(2):129-140. Cui B,Wang J J,Guo X R,1999. Real-time forecast experiments using MM5 in National Meteorological Center[J]. J Appl Meteor Sci,10(2):129-140(in Chinese).
- 邓华,2007. 不同积云对流参数化方案模拟华南降水的研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Deng H,2007. Research on simulation of South China precipitation with different cumulus parameterization schemes[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 邓华,薛纪善,徐海明,等,2008. GRAPES 中尺度模式中不同对流参数化方案模拟对流激发的研究[J]. 热带气象学报,24(4):327-334. Deng H,Xue J S,Xu H M,et al,2008. Study of different cumulus parameterization schemes of GRAPES-Meso model in simulation of convection provocation[J]. J Trop Meteor,24(4):327-334(in Chinese).
- 丁一汇,1989. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京:气象出版社:114-144. Ding Y H,1989. Diagnostic Analysis Method in Synoptic Dynamics[M]. Beijing:China Meteorological Press:114-144(in Chinese).
- 丁一汇,2005. 高等天气学:第2版[M]. 北京:气象出版社:309-495. Ding Y H,2005. Advanced Synoptic Meteorology:2nd Edition [M]. Beijing:China Meteorological Press:309-495(in Chinese).
- 丁一汇,王笑芳,1988. 1983 年长江中游梅雨期的热源和热汇分析[J]. 热带气象学报,4(2):134-145. Ding Y H,Wang X F,1988. An analysis of distribution of apparent heat sources and sinks over the middle reaches of the Yangtze River during the Meiyu

- season in 1983[J]. *J Trop Meteor*, 4(2):134-145(in Chinese).
- 董步文, 丑纪范, 1988. 西太平洋副热带高压脊线位置季节变化的实况分析和理论模拟[J]. *气象学报*, 46(3):361-364. Dong B W, Chou J F, 1988. Actual analysis and theoretical simulation about position of subtropical highs over western Pacific[J]. *Acta Meteor Sinica*, 46(3):361-364(in Chinese).
- 董敏, 余建锐, 高守亭, 1999. 东亚西风急流变化与热带对流加热关系的研究[J]. *大气科学*, 23(1):62-70. Dong M, Yu J R, Gao S T, 1999. A study on the variations of the westerly jet over East Asia and its relation with the tropical convective heating[J]. *Chinese J Atmos Sci*, 23(1):62-70(in Chinese).
- 董敏, 朱文妹, 徐祥德, 2001. 青藏高原地表热通量变化及其对初夏东亚大气环流的影响[J]. *应用气象学报*, 12(4):458-468. Dong M, Zhu W M, Xu X D, 2001. The variation of surface heat flux over Tibet Plateau and its influences on the East Asia circulation in early summer[J]. *J Appl Meteor Sci*, 12(4):458-468(in Chinese).
- 冯文, 符式红, 赵付竹, 2015. 近 10 年海南岛后汛期特大暴雨环流配置及其异常特征[J]. *气象*, 41(2):143-152. Feng W, Fu S H, Zhao F Z, 2015. Circulation of extreme rainstorm and its anomalous characteristics during post-flood period of the last decade in Hainan Island[J]. *Meteor Mon*, 41(2):143-152(in Chinese).
- 冯志强, 黄志兴, 刘嘉玲, 1994. 非绝热加热对南海夏季风建立的作用[J]. *热带海洋*, 13(4):17-24. Feng Z Q, Huang Z X, Liu J L, 1994. Effects of diabatic heating on the establishment of summer monsoon over the South China Sea[J]. *Tropic Ocean*, 13(4):17-24(in Chinese).
- 高丽, 2006. 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(大气物理研究所). Gao L, 2006. Theoretical studies and diagnostic analyses of perturbation potential energy[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences(The Institute of Atmospheric Physics)(in Chinese).
- 高丽, 李建平, 2013. 非绝热加热对大气局地扰动位能的影响和机理[J]. *地球物理学报*, 56(10):3255-3269. Gao L, Li J P, 2013. Impacts and mechanism of diabatic heating on atmospheric perturbation potential energy[J]. *Chinese J Geophys*, 56(10):3255-3269(in Chinese).
- 巩远发, 段廷扬, 张茜, 2007. 夏季亚洲大气热源汇的变化特征及其与江淮流域旱涝的关系[J]. *大气科学*, 31(1):89-98. Gong Y F, Duan T Y, Zhang H, 2007. Characteristics of the atmospheric heating source/sink over Asia and its relationship with drought/flood in the Yangtze River-Huaihe River Valley[J]. *Chinese J Atmos Sci*, 31(1):89-98(in Chinese).
- 桂海林, 周兵, 金荣花, 2010. 2007 年淮河流域暴雨期间大气环流特征分析[J]. *气象*, 36(8):8-18. Gui H L, Zhou B, Jin R H, 2010. Analysis on general circulation heavy rainfall during June-July characteristics of the 2007 in Huaihe Valley[J]. *Meteor Mon*, 36(8):8-18(in Chinese).
- 韩存博, 马耀明, 刘新, 等, 2014. 利用 ASTER 数据反演珠峰地区地表特征参数[J]. *高原气象*, 33(3):596-606. Han C B, Ma Y M, Liu X, et al, 2014. Land surface characteristic variables estimated from ASTER images over Qomolangma area[J]. *Plateau Meteor*, 33(3):596-606(in Chinese).
- 郝小翠, 张强, 杨泽粟, 2015. 陇中黄土高原垂直感热平流输送对 LAS 和 EC 观测感热通量差异的影响[J]. *中国沙漠*, 35(1):211-219. Hao X C, Zhang Q, Yang Z S, 2015. Impact of vertical sensible heat advection on differences between LAS and EC measured acnsible heat flux over the Loess Plateau in Central Gansu, China[J]. *J Desert Res*, 2015, 35(1):211-219(in Chinese).
- 郝小翠, 张强, 杨泽粟, 2016. 陇东黄土高原下垫面不均匀性指标的建立及其对大孔径闪烁仪(LAS)观测感热通量的影响[J]. *地球物理学报*, 59(3):816-827. Hao X C, Zhang Q, Yang Z S, 2016. A new index for land surface inhomogeneity and its impact on sensible heat flux measured by Large Aperture Scintillometer (LAS) over eastern Gansu of Loess Plateau[J]. *Chinese J Geophys*, 59(3):816-827(in Chinese).
- 贺海晏, 1995. 台风移动规律的研究 I. 非绝热加热与水平温度分布的影响[J]. *热带气象学报*, 11(1):1-9. He H Y, 1995. A study on typhoon movement I. The effect of diabatic heating and horizontal temperature distribution[J]. *J Trop Meteor*, 11(1):1-9(in Chinese).
- 华明, 2003. 青藏高原热状况对夏季西南地区气候影响的分析及模拟[J]. *高原气象*, 22(S1):152-156. Hua M, 2003. Analysis and simulation study on the influence of heat condition over Qinghai-Xizang Plateau on climate over Southwest China[J]. *Plateau Meteor*, 22(S1):152-156(in Chinese).
- 黄青兰, 刘伯奇, 李菲, 2017. 由冬至夏北半球副热带地区大气热源的季转特征及其可能机制[J]. *大气科学*, 41(5):1010-1026. Huang Q L, Liu B Q, Li F, 2017. Seasonal transition of atmospheric heating source in the Northern Hemisphere from winter to summer and its possible mechanism [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 41(5):1010-1026(in Chinese).
- 黄荣辉, 1985. 夏季青藏高原上空热源异常对北半球大气环流异常的作用[J]. *气象学报*, 43(2):208-220. Huang R H, 1985. The influence of the heat source anomaly over Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric circulation anomalies[J]. *Acta Meteor Sinica*, 43(2):208-220(in Chinese).
- 黄荣辉, 李维京, 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制[J]. *大气科学*, 12(S1):107-116. Huang R H, Li W J, 1988. The impact of the anomalous heat sources over the eastern Tibetan Plateau on the circulation over East Asia in summer half year[J]. *Sci Atmos Sinica*, 12(S1):107-116(in Chinese).
- 黄荣辉, 严邦良, 1987. 地形与热源强迫在亚洲夏季季风形成与维持中的物理作用[J]. *气象学报*, 45(4):394-407. Huang R H, Yan B L, 1987. The effects of topographical and thermal forcing on formation and maintenance of the summer monsoon over Asia [J]. *Acta Meteor Sinica*, 45(4):394-407(in Chinese).
- 黄小梅, 肖丁木, 焦敏, 等, 2014. 近 30 年青藏高原大气热源气候特征研究[J]. *高原山地气象研究*, 34(4):38-43. Huang X M, Xiao D M, Jiao M, et al, 2014. Climatic characteristics of the atmospheric

- heat source over Tibetan Plateau in recent 30 years[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 34(4):38-43(in Chinese).
- 黄兴春,江静,2008. ENSO 事件对东亚副热带西风急流影响的诊断分析[J]. 气象科学, 28(1):15-20. Huang X C, Jiang J, 2008. The diagnostic analysis of the impact of ENSO events on East Asia subtropical westerly jet [J]. Scientia Meteor Sinica, 28(1):15-20 (in Chinese).
- 简茂球,罗会邦,乔云亭,2004. 青藏高原东部和西太平洋暖池区大气热源与中国夏季降水的关系[J]. 热带气象学报, 20(4):355-364. Jian M Q, Luo H B, Qiao Y T, 2004. On the relationships between the summer rainfall in China and the atmospheric heat sources over the eastern Tibetan Plateau and the western Pacific warm pool[J]. J Trop Meteor, 20(4):355-364(in Chinese).
- 江敦春,韦统健,1983. 西南低空急流的能量学分析[J]. 南京气象学院学报, (2):204-214. Jiang D C, Wei T J, 1983. Energetic analysis of the southwesterly low-level jet stream[J]. J Nanjing Institute Meter, (2):204-214(in Chinese).
- 蒋全荣,郑定英,余志豪,1997. 副热带高压季节性移动与海温场的联系[J]. 大气科学, 21(2):199-204. Jiang Q R, Zheng D Y, Yu Z H, 1997. The relation of the seasonal movement of the subtropical high over Northwestern Pacific with SST[J]. Sci Atmos Sinica, 21(2):199-204(in Chinese).
- 金琼,2011. 东亚大陆的潜热反馈对亚洲夏季风环流的建立与维持的影响及机制研究[D]. 南京:南京大学. Jin Q, 2011. The feedback of latent heating over East Asian continent on the establishment and maintenance of the Asian summer monsoon circulation[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).
- 况雪源,张耀存,2006. 东亚副热带西风急流季节变化特征及其热力影响机制探讨[J]. 气象学报, 64(5):564-575. Kuang X Y, Zhang Y C, 2006. The seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet and its thermal mechanism[J]. Acta Meteor Sinica, 64(5):564-575(in Chinese).
- 蓝光东,温之平,贺海晏,2005. ERA 与 NCEP2 大气热源的对比分析以及全球大气热源性质变化规律的研究[J]. 大气科学, 29(1):154-163. Lan G D, Wen Z P, He H Y, 2005. Comparison of the atmospheric heat sources obtained from ERA and those from NCEP2 and study of the variations in the nature of heating over the global atmosphere[J]. Chinese J Atmos Sci, 29(1):154-163 (in Chinese).
- 雷小途,1998. 非绝热加热对热带气旋非对称结构影响的数值试验[J]. 热带气象学报, 14(3):208-217. Lei X T, 1998. The numerical experiment of the influence of diabatic heating on tropical cyclone asymmetric structure[J]. J Trop Meteor, 14(3):208-217 (in Chinese).
- 李柏,俞卫平,卢云,等,2002. 江淮气旋发生发展中尺度系统特征数值模拟研究[J]. 气象科学, 22(1):72-80. Li B, Yu W P, Lu Y, et al, 2002. The numerical simulating study of the mesoscale characteristics on development of Jiang-Huai cyclones [J]. Scientia Meteor Sinica, 22(1):72-80(in Chinese).
- 李斌,高荣珍,杨晓霞,2009. 二次不同路径江淮气旋暴雨特征对比分析[C]//第 26 届中国气象学会年会论文集. 杭州:中国气象学会;11. Li B, Gao R Z, Yang X X, 2009. Comparative analysis of the characteristics of cyclone rainstorm over the second different paths in Jianghuai region[C]. //Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Hangzhou: Chinese Meteorological Society;11(in Chinese).
- 李崇银,王作台,林士哲,等,2004. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究[J]. 大气科学, 28(5):641-658. Li C Y, Wang Z T, Lin S Z, et al, 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location[J]. Chinese J Atmos Sci, 28(5):641-658(in Chinese).
- 李国平,卢会国,黄楚惠,等,2016. 青藏高原夏季地面热源的气候特征及其对高原低涡生成的影响[J]. 大气科学, 40(1):131-141. Li G P, Lu H G, Huang C H, et al, 2016. A climatology of the surface heat source on the Tibetan Plateau in summer and its impacts on the formation of the Tibetan Plateau vortex[J]. Chinese J Atmos Sci, 40(1):131-141(in Chinese).
- 李俊,瞿章,王安宇,等,1985. 非绝热加热作用对印度西南季风中断向活跃转变过程影响的数值试验[J]. 高原气象, 4(S1):77-86. Li J, Qu Z, Wang A Y, et al, 1985. A numerical simulation of diabatic heating effect on transition of Indian southwest monsoon from break to activeness[J]. Plateau Meteor, 4(S1):77-86 (in Chinese).
- 李文卓,2016. 青藏高原非绝热加热特征及其与降水、流场的关系[D]. 合肥:中国科学技术大学. Li W Z, 2016. The characteristics of atmospheric diabatic heating and its relationships with precipitation and circulation over Tibetan Plateau[D]. Hefei: University of Science and Technology of China(in Chinese).
- 李永华,卢楚翰,徐海明,等,2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J]. 大气科学, 35(3):422-434. Li Y H, Lu C H, Xu H M, et al, 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern Southwest China[J]. Chinese J Atmos Sci, 35(3):422-434(in Chinese).
- 李永生,刘伯奇,王莹,等,2016. 非绝热加热对 6 月东北冷涡形成演变的影响及其可能机制[J]. 气象与环境学报, 32(6):19-26. Li Y S, Liu B Q, Wang Y, et al, 2016. Effect and possible mechanism of diabatic heating on evolution of cold vortex over Northeast China in June[J]. J Meteor Environ, 32(6):19-26(in Chinese).
- 廖镜彪,王雪梅,夏北成,等,2012. WRF 模式中微物理和积云参数化方案的对比试验[J]. 热带气象学报, 28(4):461-470. Liao J B, Wang X M, Xia B C, et al, 2012. The effects of different physics and cumulus parameterization schemes in WRF on heavy rainfall simulation in PRD[J]. J Trop Meteor, 28(4):461-470 (in Chinese).
- 廖清海,高守亭,王会军,等,2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季气候异常的影响[J]. 地球物理学报, 47(1):10-18. Liao Q H, Gao S T, Wang H J, et al, 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the Northern Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies

- [J]. Chinese J Geophys, 47(1):10-18(in Chinese).
- 林贤超,徐淑英,1989. 东亚季风强弱变化及其对初夏我国东部地区降水的影响[J]. 地理研究, 8(2):44-54. Lin X C, Xu S Y, 1989. The variation of summer monsoon systems and its effect on the precipitation in the early summer in East China[J]. Geograph Res, 8(2):44-54(in Chinese).
- 刘鹏,钱永甫,严蜜,2011. 东亚下垫面热力异常与南海夏季风爆发早晚和强弱的关系[J]. 热带气象学报, 27(2):209-218. Liu P, Qian Y F, Yan M, 2011. The relation between the underlying surface thermal anomalies and the onset and intensity of the South China Sea summer monsoon[J]. J Trop Meteor, 27(2):209-218(in Chinese).
- 刘向文,孙照渤,顾伟宗,等,2009. 我国东部季风区夏季持续非绝热加热的特征分析和数值试验[J]. 大气科学, 33(1):71-80. Liu X W, Sun Z B, Gu W Z, et al, 2009. Feature analysis and numerical experiments of the persistent diabatic heating in the summer monsoon regions in eastern China[J]. Chinese J Atmos Sci, 33(1):71-80(in Chinese).
- 刘屹岷,1998. 非绝热加热影响北半球夏季副热带高压形态变异的物理机制[D]. 北京:中国科学院研究生院(大气物理研究所). Liu Y M, 1998. Impacts of spatially non-uniform diabatic heating on the formation of subtropical anticyclone in boreal summer[D]. Beijing:Chinese Academy of Sciences(The Institute of Atmospheric Physics)(in Chinese).
- 刘屹岷,刘辉,刘平,等,1999a. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 II: 陆面感热与东太平洋副高[J]. 气象学报, 57(4):385-396. Liu Y M, Liu H, Liu P, et al, 1999a. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high Part II: land surface sensible heating and East Pacific subtropical high[J]. Acta Meteor Sinica, 57(4):385-396(in Chinese).
- 刘屹岷,吴国雄,刘辉,等,1999b. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高[J]. 气象学报, 57(5):525-538. Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al, 1999b. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high Part III: condensation heating and South Asia high and Western Pacific subtropical high[J]. Acta Meteor Sinica, 57(5):525-538(in Chinese).
- 刘屹岷,吴国雄,2000. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识[J]. 气象学报, 58(4):500-512. Liu Y M, Wu G X, 2000. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems[J]. Acta Meteor Sinica, 58(4):500-512(in Chinese).
- 陆尔,丁一汇, Murakami M, 等, 1997. 1991 年江淮特大暴雨的降水性质与对流活动[J]. 气象学报, 55(3):318-333. Lu E, Ding Y H, Murakami M, et al, 1997. Nature of precipitation and activity of cumulus convection during the 1991 Meiyu season[J]. Acta Meteor Sinica, 55(3):318-333(in Chinese).
- 马迪,吕世华,陈晋北,等,2010. 大孔径闪烁仪测量戈壁地区感热通量[J]. 高原气象, 29(1):56-62. Ma D, Lü S H, Chen J B, et al, 2010. Surface sensible heat fluxes monitored by large aperture scintillometers at Gebi of Jinta[J]. Plateau Meteor, 29(1):56-62(in Chinese).
- 牛丹,2015. 冷暖季江淮气旋入海发展过程与机制对比研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Niu D, 2015. Comparative study on the process and mechanism of Jianghuai cyclones developing on the sea between warm and cold season[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 钱永甫,沈金妹,1990. 非绝热过程对热带副热带环流和天气影响的数值预报试验[J]. 热带气象学报, 6(3):193-202. Qian Y F, Shen J M, 1990. Numerical prediction experiments of effects of diabatic heating process on circulation and weather in the tropical and subtropical regions[J]. J Trop Meteor, 6(3):193-202(in Chinese).
- 钱永甫,王谦谦,1993. 夏季季风区气候的模拟特征[J]. 热带气象学报, 9(1):90-96. Qian Y F, Wang Q Q, 1993. Simulated properties of the climate in the summer monsoon area[J]. J Trop Meteor, 9(1):90-96(in Chinese).
- 钱贞成,喻世华,1991. 东亚地区凝结加热的中期变动与西太平洋副高准双周振荡的关系[J]. 热带气象学报, 7(3):259-267. Qian Z C, Yu S H, 1991. The relationship between medium-range fluctuation of condensation heating in East Asia and quasi-2 weeks oscillation of the West Pacific subtropical high[J]. J Trop Meteor, 7(3):259-267(in Chinese).
- 邱斌,李亚春,曾刚,2013. 冬季东亚副热带西风急流变化及其与海表温度的关系[J]. 气象科学, 33(4):400-407. Qiu B, Li Y C, Zeng G, 2013. Variation of the East Asian subtropical westerly jet and its relation with sea surface temperature[J]. J Meteor Sci, 33(4):400-407(in Chinese).
- 赛瀚,2012. 环渤海地区低空急流时空结构特征研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Sai H, 2012. The spatial-temporal structure characteristic of low-level jet over Bohai Rim[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 赛瀚,苗峻峰,2012a. 中国地区低空急流研究进展[J]. 气象科技, 40(5):766-771. Sai H, Miao J F, 2012a. A review of low-level jet research in China[J]. Meteor Sci Technol, 40(5):766-771(in Chinese).
- 赛瀚,苗峻峰,2012b. 环渤海地区低空急流的时空分布特征[J]. 自然灾害学报, 21(6):91-98. Sai H, Miao J F, 2012b. Spatiotemporal distribution characteristics of low-level Jet over Bohai Sea rim[J]. J Natural Disasters, 21(6):91-98(in Chinese).
- 申乐琳,何金海,陈隆勋,等,2009. 青藏高原热力状况对东亚夏季副热带西风急流的影响[J]. 气象与减灾研究, 32(1):25-31. Shen L L, He J H, Chen L X, et al, 2009. Thermal effect of Tibetan Plateau on East Asia subtropical westerly jet in summer[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 32(1):25-31(in Chinese).
- 沈如金,纪立人,1990. 热源扰动对亚洲夏季季风环流的影响[J]. 气象学报, 48(2):139-149. Shen R J, Ji L R, 1990. The effects of anomalous heating on summer monsoon over Asia[J]. Acta Meteor Sinica, 48(2):139-149(in Chinese).
- 沈如金,张宝严,1982. 凝结潜热加热对台风降水分布的影响[J]. 大

- 气科学,6(3):249-257. Shen R J, Zhang B Y, 1982. The effect of condensation heating on the distribution of the precipitation of typhoon[J]. *Sci Atmos Sinica*, 6(3): 249-257(in Chinese).
- 盛华, 陶诗言, 1991. 非绝热加热对江淮气旋影响的数值模拟[J]. *大气科学*, 15(3): 55-65. Sheng H, Tao S Y, 1991. Numerical simulation of influence of diabatic heating on extratropical cyclone in the east coast of China[J]. *Sci Atmos Sinica*, 15(3): 55-65(in Chinese).
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵, 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常[J]. *大气科学*, 20(5): 575-583. Shi N, Zhu Q G, Wu B G, 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years[J]. *Sci Atmos Sinica*, 20(5): 575-583(in Chinese).
- 孙建元, 朱伟军, 姚秀萍, 2013. 东风带扰动热力特征及其对西太副高东退影响的个例分析[J]. *高原气象*, 32(3): 707-717. Sun J Y, Zhu W J, Yao X P, 2013. Case studies on thermodynamic characteristics of vortex in the easterlies and its impact on eastward retreat of the subtropical anticyclone over the Western Pacific[J]. *Plateau Meteor*, 32(3): 707-717(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 225. Tao S Y, 1980. Rainstorms in China[M]. Beijing: Science Press: 225(in Chinese).
- 王坚红, 牛丹, 任淑媛, 等, 2015. 不同深厚气旋入海发展中环境因子作用对比研究[J]. *热带气象学报*, 31(6): 744-756. Wang J H, Niu D, Ren S Y, et al, 2015. Comparative study on development of different deep Jianghuai Rivers cyclones entering the sea and the influence of environmental factors[J]. *Acta Meteor Sinica*, 31(6): 744-756(in Chinese).
- 王开存, 周秀骥, 李维亮, 等, 2005. 利用卫星遥感资料反演感热和潜热通量的研究综述[J]. *地球科学进展*, 20(1): 42-48. Wang K C, Zhou X J, Li W L, et al, 2005. Using satellite remotely sensed data to retrieve sensible and latent heat fluxes: a review[J]. *Adv Earth Sci*, 20(1): 42-48(in Chinese).
- 王黎娟, 陈璇, 管兆勇, 等, 2011. 江淮流域持续性强降水期间西太副高位置变异与非绝热加热的关系[J]. *热带气象学报*, 27(3): 327-335. Wang L J, Chen X, Guan Z Y, et al, 2011. Relationship between the position variation of the West Pacific subtropical high and the diabatic heating during persistent heavy rain events in Yangtze-Huaihe Rivers Basin[J]. *J Trop Meteor*, 27(3): 327-335(in Chinese).
- 王黎娟, 陈璇, 管兆勇, 等, 2009a. 我国南方洪涝暴雨期西太平洋副高短期位置变异的特点及成因[J]. *大气科学*, 33(5): 1047-1057. Wang L J, Chen X, Guan Z Y, et al, 2009a. Features of the short-term position variation of the western Pacific subtropical high during the torrential rain causing severe floods in southern China and its possible cause[J]. *Chinese J Atmos Sci*, 33(5): 1047-1057(in Chinese).
- 王黎娟, 管兆勇, 何金海, 等, 2009b. “05. 6” 华南强降水期间副热带高压活动与加热场的关系[J]. *气象学报*, 67(4): 666-673. Wang L J, Guan Z Y, He J H, et al, 2009b. Relationship between activity of western Pacific subtropical high and diabatic heating during heavy rain in South China in June 2005[J]. *Acta Meteor Sinica*, 67(4): 666-673(in Chinese).
- 王黎娟, 温敏, 罗玲, 等, 2005. 西太平洋副高位置变动与大气热源的关系[J]. *热带气象学报*, 21(5): 488-496. Wang L J, Wen M, Luo L, et al, 2005. The relationship between the position variation of the West Pacific subtropical high and the apparent heating[J]. *J Trop Meteor*, 21(5): 488-496(in Chinese).
- 王谦谦, 葛朝霞, 1992. 七月中、低纬地区定常波动和加热场的模拟特征[J]. *热带气象学报*, 8(2): 151-159. Wang Q Q, Ge Z X, 1992. Simulated properties of stationary waves and heating fields in the mid-and-low latitudes in July[J]. *J Trop Meteor*, 8(2): 151-159(in Chinese).
- 王胜, 张强, 卫国安, 2005. 敦煌绿洲-戈壁过渡带地表辐射与能量特征分析[J]. *高原气象*, 24(4): 556-562. Wang S, Zhang Q, Wei G A, 2005. Analyses on characters of surface radiation and energy at oasis-desert transition zone in Dunhuang[J]. *Plateau Meteor*, 24(4): 556-562(in Chinese).
- 王振会, 2011. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社: 149-185. Wang Z H, 2011. Atmospheric Exploration[M]. Beijing: China Meteorological Press: 149-185(in Chinese).
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等, 2003. 副热带高压研究进展及展望[J]. *大气科学*, 27(4): 503-517. Wu G X, Chou J F, Liu Y M, et al, 2003. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone[J]. *Chinese J Atmos Sci*, 27(4): 503-517(in Chinese).
- 吴国雄, 刘还珠, 1999. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展[J]. *气象学报*, 57(1): 1-15. Wu G X, Liu H Z, 1999. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development[J]. *Acta Meteor Sinica*, 57(1): 1-15(in Chinese).
- 吴国雄, 刘新, 张琼, 等, 2002. 青藏高原抬升加热气候效应研究的新进展[J]. *气候与环境研究*, 7(2): 184-201. Wu G X, Liu X, Zhang Q, et al, 2002. Progresses in the study of the climate impacts of the elevated heating over the Tibetan Plateau[J]. *Climatic Environ Res*, 7(2): 184-201(in Chinese).
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平, 1999. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I: 尺度分析[J]. *气象学报*, 57(3): 257-263. Wu G X, Liu Y M, Liu P, 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high part I. scale analysis[J]. *Acta Meteor Sinica*, 57(3): 257-263(in Chinese).
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等, 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局[J]. *大气科学*, 29(1): 47-56. Wu G X, Liu Y M, Liu X, et al, 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer[J]. *Chinese J Atmos Sci*, 29(1): 47-56(in Chinese).
- 伍华平, 束炯, 顾莹, 等, 2009. 暴雨模拟中积云对流参数化方案的对比试验[J]. *热带气象学报*, 25(2): 175-180. Wu H P, Shu J, Gu Y, et al, 2009. The effects of different cumulus parameterization schemes in WRF on heavy rainfall in Hunan Province[J]. *J Trop Meteor*, 25(2): 175-180(in Chinese).
- 项素清, 2008. 温带气旋发展引起的海上大风预报研究[D]. 杭州: 浙江大学. Xiang S Q, 2008. The forecast research of strong winds

- at sea caused by extratropical cyclone[D]. Hangzhou: Zhejiang University(in Chinese).
- 许田田,范广洲,赖欣,等,2016. 东亚季风强弱年高原、东亚及太平洋热力对比[J]. 成都信息工程大学学报,31(6):599-606. Xu T T, Fan G Z, Lai X, et al, 2016. The thermal contrast over the Tibetan Plateau, the East Asian and the Pacific Ocean in strong and weak East Asian monsoon years[J]. J Chengdu University Inform Technol, 31(6):599-606(in Chinese).
- 徐文金,刘聪,1985. 低空急流形成的一种机制及其数值模拟试验[J]. 南京气象学院学报,8(3):231-239. Xu W J, Liu C, 1985. Mechanism of development of low-level jet streams and its numerical modelling[J]. J Nanjing Institute Meteor, 8(3):231-239(in Chinese).
- 徐祥德,王寅钧,赵天良,等,2014. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征[J]. 气象,40(10):1165-1173. Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al, 2014. Relationship between turbulent energy in the near-surface layer and atmospheric boundary layer thermodynamic structure over the southeastern side of Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 40(10):1165-1173(in Chinese).
- 徐之骁,2015. 不同云微物理和积云对流参数化方案对“7. 21”北京特大暴雨模拟的对比试验[D]. 南京:南京信息工程大学. Xu Z X, 2015. Effects of different cloud microphysical and cloud parameterization schemes on simulation of the torrential rainfall event occurring in Beijing on 21 July 2012[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 徐之骁,徐海明,2016. 不同云微物理方案对“7. 21”特大暴雨模拟的对比试验[J]. 气象,36(1):45-54. Xu Z X, Xu H M, 2016. Simulation contrast of different cloud microphysical schemes on the torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 36(1):45-54(in Chinese).
- 严蜜,钱永甫,刘健,2011. 西太平洋副热带高压强度和东亚地表热通量的年代际变化特征及关系[J]. 气象学报,69(4):610-619. Yan M, Qian Y F, Liu J, 2011. Interdecadal variations of the western Pacific subtropical high and surface heat flux over East Asia and their relationship[J]. Acta Meteor Sinica, 69(4):610-619(in Chinese).
- 姚秀萍,孙建元,2013. 东风带扰动影响西太平洋副热带高压短期东西向移动的热力强迫分析[J]. 热带气象学报,29(4):551-558. Yao X P, Sun J Y, 2013. The thermal forcing analysis of the impact of the easterlies vortex on the subtropical anticyclone over the Western Pacific east-west shift[J]. J Trop Meteor, 29(4):551-558(in Chinese).
- 叶笃正,罗四维,朱抱真,1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡[J]. 气象学报,28(2):108-121. Ye D Z, Luo S W, Zhu B Z, 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding[J]. Acta Meteor Sinica, 28(2):108-121(in Chinese).
- 叶笃正. 陶诗言,李麦村,1958. 在六月和十月大气环流的突变现象[J]. 气象学报,29(4):249-263. Ye D Z, Tao S Y, Li M C, 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October[J]. Acta Meteor Sinica, 29(4):249-263(in Chinese).
- 仪清菊,丁一汇,1996. 黄、渤海气旋暴发性发展的个案分析[J]. 应用气象学报,7(4):483-490. Yi Q J, Ding Y H, 1996. An analysis of the explosive cyclone over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. J Appl Meteor Sci, 7(4):483-490(in Chinese).
- 余莲,封彩云,2012. 青藏高原近期气候变化研究进展[J]. 高原山地气象研究,32(3):84-88. Yu L, Feng C Y, 2012. Recent progress in climate change over Tibetan Plateau[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 32(3):84-88(in Chinese).
- 于群,郭品文,张福颖,2007. 全球夏、冬季加热场的气候学特征及其年代际变化[J]. 南京气象学院学报,30(6):828-834. Yu Q, Guo P W, Zhang F Y, 2007. Climate characteristics and interdecadal changes of global summer and winter heat sources[J]. J Nanjing Institute Meteor, 30(6):828-834(in Chinese).
- 袁佳双,寿绍文,2002. 高低空位涡扰动、非绝热加热与气旋的发生发展[J]. 热带气象学报,18(2):121-130. Yuan J S, Shou S W, 2002. Genesis and development of cyclone with upper/lower potential vorticity(pv) anomaly, diabatic heating[J]. J Trop Meteor, 18(2):121-130(in Chinese).
- 张大林,1998. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用[J]. 大气科学,22(4):548-561. Zhang D L, 1998. Roles of various diabatic physical processes in mesoscale models[J]. Sci Atmos Sinica, 22(4):548-561(in Chinese).
- 张灵玲,谢倩,房佳蓓,等,2012. 全球大气季节平均热源的三维分布——非绝热加热与瞬变加热之对比[J]. 热带气象学报,28(3):321-329. Zhang L L, Xie Q, Fang J B, et al, 2012. Global atmospheric seasonal-mean heating—Diabatic versus transient heating[J]. J Trop Meteor, 28(3):321-329(in Chinese).
- 张韧,史汉生,喻世华,1995. 西太平洋副热带高压非线性稳定性问题的研究[J]. 大气科学,19(6):687-700. Zhang R, Shi H S, Yu S H, 1995. A study of non-linear stability of the Western-Pacific subtropical high[J]. Sci Atmos Sinica, 19(6):687-700(in Chinese).
- 张晓红,罗静,陈兴,等,2016. 一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析[J]. 气象,42(6):716-723. Zhang X H, Luo J, Chen X, et al, 2016. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang-Huaihe River basin and diagnostic analysis of rainstorm[J]. Meteor Mon, 42(6):716-723(in Chinese).
- 张艳焕,2004. 夏季大气热源对亚洲季风的影响及其与中国降水关系的研究[D]. 南京:南京气象学院. Zhang Y H, 2004. On the influence of the heat source on the Asian summer monsoon and the recipitation of China in summer[D]. Nanjing: Nanjing Institute Meteorology(in Chinese).
- 张艳武,冯起,吕世华,等,2005. 额济纳绿洲夏末典型晴天小气候特征分析[J]. 高原气象,24(4):516-521. Zhang Y W, Feng Q, Lü S H, et al, 2005. Analysis on microclimate characteristic of typical clear day in Ejina Oasis in late summer[J]. Plateau Meteor, 24(4):516-521(in Chinese).
- 张宇,吕世华,陈世强,等,2005. 绿洲边缘夏季小气候特征及地表辐射与能量平衡特征分析[J]. 高原气象,24(4):527-533. Zhang

- Y, Lü S H, Chen S Q, et al, 2005. Characteristics of energy budget and microclimate on the edge of oasis summer[J]. *Plateau Meteor*, 24(4): 527-533(in Chinese).
- 赵兵科, 万日金, 鲁小琴, 2010. 2003 年夏季梅雨期强弱江淮气旋成因对比分析[J]. *高原气象*, 29(2): 309-320. Zhao B K, Wan R J, Lu X Q, 2010. A contrastive analysis on the causes of strong and weak cyclones over Yangtze-Huaihe River valleys during the Meiyu period in summer of 2003[J]. *Plateau Meteor*, 29(2): 309-320(in Chinese).
- 赵鸣, 2000. 关于海面湍流通量参数化的两种方案试验[J]. *气象科学*, 20(3): 317-325. Zhao M, 2000. On the experiments of two schemes about the computation of fluxes over sea[J]. *Sci Meteor Sinica*, 20(3): 317-325(in Chinese).
- 赵平, 陈隆勋, 2001. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系[J]. *中国科学(D 辑)*, 31(4): 327-332. Zhao P, Chen L X, 2001. Climatic characteristics of atmospheric heat source on Tibetan Plateau and its relationship with precipitation in China in the past 35 years[J]. *Sci China(Series D)*, 31(4): 327-332(in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. *气象*, 44(3): 351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the in 20 July 2016 unusual heavy rainfall North China and Beijing[J]. *Meteor Mon*, 44(3): 351-360(in Chinese).
- 钟珊珊, 何金海, 管兆勇, 等, 2009. 1961—2001 年青藏高原大气热源的气候特征[J]. *气象学报*, 67(3): 407-416. Zhong S S, He J H, Guan Z Y, et al, 2009. Climatic characteristics of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during 1961—2001[J]. *Acta Meteor Sinica*, 67(3): 407-416(in Chinese).
- 周兵, 徐海明, 谭言科, 等, 2001. 1998 年武汉大暴雨过程的切变涡度及非绝热加热垂直结构分析[J]. *气象学报*, 59(6): 707-718. Zhou B, Xu H M, Tan Y K, et al, 2001. Research on vertical section of shear vorticity and diabatic heating with Wuhan torrential rain in 1998[J]. *Acta Meteor Sinica*, 59(6): 707-718(in Chinese).
- 周胜男, 罗亚丽, 汪会, 2015. 青藏高原、中国东部及北美副热带地区夏季降水系统发生频次的 TRMM 资料分析[J]. *气象*, 41(1): 1-16. Zhou S N, Luo Y L, Wang H, 2015. Analysis of occurrence frequency of precipitation feature over Tibetan Plateau, East China and subtropical North America in boreal summer using TRMM data[J]. *Meteor Mon*, 41(1): 1-16(in Chinese).
- 周彦均, 2015. 边界层参数化方案对暴雨模拟结果的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Zhou Y J, 2015. Research on the impact of PBL parameterizations to simulation of the heavy rainfall [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法: 第 4 版[M]. 北京: 气象出版社: 192-584. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. *The Principles and Methods of Weather*: 4th edition[M]. Beijing: China Meteorological Press: 192-584(in Chinese).
- Ahmadi-Givi F, Graig G C, Plant R S, 2004. The dynamics of a midlatitude cyclone with very strong latent-heat release[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130(596): 295-323.
- Benjamin S G, Carlson T N, 1986. Some effects of surface heating and topography on the regional severe storm environment. Part I: three-dimensional simulations[J]. *Mon Wea Rev*, 114(2): 307-329.
- Bonner W D, Paegle J, 1970. Diurnal variations in boundary layer winds over the South-Central United States in summer[J]. *Mon Wea Rev*, 98(10): 735-744.
- Braun S A, Tao W K, 2000. Sensitivity of high-resolution simulations of hurricane bob (1991) to planetary boundary layer parameterizations[J]. *Mon Wea Rev*, 128(12): 3941-3961.
- Danard M B, 1964. On the influence of released latent heat on cyclone development[J]. *J Appl Meteor*, 3(1): 27-37.
- Ding Y H, 1992. Summer monsoon rainfalls in China[J]. *J Meteor Soc Japan*, 70(1B): 373-396.
- Flohn H, 1960. Recent Investigation on the Mechanism of the “Summer Monsoon” of Southern and Eastern Asia[C]// *Proceedings of Symposium on Monsoon of the World*. New Delhi: Hind Union Press: 75-88.
- Holton J R, 1967. The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain[J]. *Tellus*, 19(2): 199-205.
- Jankov I, Gallus W A Jr, Segal M, et al, 2005. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall[J]. *Wea Forecasting*, 20(6): 1048-1060.
- Jiang Xianan, Lau N C, Held I M, et al, 2007. Mechanisms of the great plains low-level jet as simulated in an AGCM[J]. *J Atmos Sci*, 64(2): 532-547.
- Krishnamurti T N, 1979. *Compendium of meteorology*, Vol. 2, Part 4: Tropical meteorology[R]. Geneva: World Meteorological Organization: 364.
- Kuo H L, 1974. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow[J]. *J Atmos Sci*, 31(5): 1232-1240.
- Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al, 2001. Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the Eastern Hemisphere[J]. *Climate Dyn*, 17(4): 327-338.
- Luo H B, Yanai M, 1984. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part II: Heat and moisture budgets[J]. *Mon Wea Rev*, 112(5): 966-989.
- Rajeevan M, Kesarkar A, Thampi S B, et al, 2010. Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over Southeast India[J]. *Ann Geophys*, 28(2): 603-619.
- Rodwell M J, Hoskins B J, 1996. Monsoons and the dynamics of deserts[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(534): 1385-1404.
- Schaack T K, Johnson D R, Wei M Y, 1990. The three-dimensional distribution of atmospheric heating during the GWE[J]. *Tellus A*, 42(3): 305-327.
- Stensrud D J, 1996. Importance of low-level jets to climate: a review[J].

- J Climate, 9(8):1698-1711.
- Ueda H, Kamahori H, Yamazaki N, 2003. Seasonal contrasting features of heat and moisture budgets between the eastern and Western Tibetan Plateau during the GAME IOP[J]. J Climate, 16(14):2309-2324.
- Webster P J, 1977. The low-latitude circulation of Mars[J]. Icarus, 30(4):626-649.
- Webster P J, 1981. Monsoons[J]. Sci Am, 245(2):108-118.
- Wei M Y, Johnson D R, Townsend R D, 1983. Seasonal distributions of diabatic heating during the First GARP Global Experiment [J]. Tellus A, 35A(4):241-255.
- Yanai M, Li C F, Song Z S, 1992. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon[J]. J Meteor Soc Japan, 70(1):319-350.
- Yang S, Webster P J, 1990. The effect of summer tropical heating on the location and intensity of the extratropical westerly jet streams[J]. J Geophys Res, 95(D11):18705-18721.
- Yao X L, Sun J Y, 2016. Thermal forcing impacts of the easterly vortex on the east-west shift of the subtropical anticyclone over western Pacific Ocean[J]. J Trop Meteor, 22(1):51-56.
- Zhou T J, Yu R C, 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J Geophys Res, 110(D8):D08104.