

瞬变涡扰动法在极端天气事件预报中的应用

钱维宏

(北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871)

摘要: 实际天气图上的系统由多尺度波和多尺度涡组成。Rossby对天气预报的重大贡献是提出了大气长波。全球数值天气预报谱模式把观测大气变量分解成了若干尺度的数学波, 而没有天气尺度的涡。大气变量物理分解可得到逐日气候波、行星尺度的瞬变波和天气尺度的瞬变涡。实际的天气变化是由逐日气候波、行星尺度瞬变波和天气尺度瞬变涡的叠加或相互作用形成的。与极端天气事件直接有关的是那些瞬变涡, 因此极端天气事件的预报可用瞬变涡扰动法。

关键词: 天气预报, 大气长波, 瞬变波, 瞬变涡

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.05.006

Transient Eddy Method and its Application on the Forecast of Extreme Weather Events

Qian Weihong

(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: On the actual weather map, the weather system consists of multi-scale waves and multi-scale eddies. Rossby proposed the atmospheric long-wave theory which has a significant contribution to the weather forecast in the past decades. Global numerical weather prediction spectral model decomposed atmospheric variables into multi-scale mathematical waves without the synoptic-scale eddies. Physical decomposition of atmospheric variables can be used to differentiate the daily climatic waves from planetary-scale transient waves and synoptic-scale transient eddies. Extreme weather events are directly related to the synoptic-scale transient eddies so that extreme weather events can be forecasted by the method of transient eddies. The actual weather evolution is formed from their overlap or interaction of daily climatic waves, the planetary-scale transient waves and synoptic-scale transient eddies.

Keywords: Weather forecast, atmospheric long wave, transient wave, transient eddy

1 引言

长期以来, 大气被作为地球流体考虑, 其运动满足Navier-Stokes方程, 包含热力学在内的这组方程是复杂的非线性方程。早在20世纪初, Rossby等^[1]对这套自由大气中的非线性方程做了线性化处理, 创立了长波理论。过去的几十年中, 高空天气图上的“槽来脊去”(大气长波)形成了短期天气预报的基本方法。长波的“槽前一脊后”有利于地面低压系统发展和出现降水天气, 而“槽后一脊前”对应地面高压系统发展和晴好天气。长波的移动速度决定了地面天气系统的变化。在正压大气Rossby波的移动公式中, 西风带中平均的西风风速与波长之间构成了波移动的决定因素。西风风速大, 而波长短的波, 向东移动的速度快。在波长足够长的时候, 长波会静止下来, 甚至后退(向西移动)。长波存在于旋转地球的中高纬度带大气中。

在同一个时刻(如世界时00或12时), 全球探空

观测站同时得到分布于全球的大气风和温度等要素。多个时刻的一个要素可以用谱(如球谐函数)展开的方法把观测要素展开成若干的正交波。计算机只要记录下所有波的模态及其时间系数, 一旦需要, 计算机又可以根据模态和系数还原成原始要素场。

基于天气图方法, 预报员根据过去几个时次的大气长波移动可以外推出未来时刻的槽或脊的位置, 从而预测未来对应环流下的天气。数值模式只用当前一个时刻的观测场就确定了当前的变化趋势, 又由前一时次的观测和当前时刻的趋势得到了下一时刻的预报。大气运动多以波动的形式出现。一个时刻的变化趋势(或平流), 甚至两个时刻观测变量确定的趋势也不能很好地描述大气运动的多时间尺度波动特性。因此, 数值天气预报需要多个时刻的观测资料, 才能反映出历史的波动变化^[2, 3]。全球数值天气预报模式是把观测的大气变量分解成了几百个正交的波。这些波在计算机模型中随时间积分发生相互作用又形成了新的波。人们很难确定所有这些波的物理含义和对应的天气或气候。

本文介绍一种新的大气变量物理分解法, 其中分

收稿日期: 2012年3月12日; 修回日期: 2012年4月1日
作者: 钱维宏(1957—), Email: qianwh@pku.edu.cn

解的各部分具有明确的天气和气候意义。

2 大气变量的物理解析

观测的大气变量变化是多源强迫的结果。观测的大气变量中包含：太阳辐射日循环的强迫，太阳辐射年循环的强迫，海气年际相互作用的强迫，准11a^[4]和准22a太阳辐射的周期性强迫，准60a^[5]的海气相互作用强迫，以及更长时间尺度太阳辐射和地球轨道参数变化的强迫^[6, 7]。

考虑上述几个强迫形成的大气变化分量和大气环流的平衡特性^[8]，全球大气观测变量可以分解成纬圈和时间平均的气候对称部分、时间平均的气候非对称部分、纬圈平均的瞬时对称部分和瞬时非对称部分。满足这四部分分解的方法称为物理解析^[9]。全球大气温度、位势高度和风等都可以物理解析为四个部分。以下的分解式中， $V(\lambda, \varphi, t)_Y^*$ 是第Y年第t日确定时刻（如世界时00时）的瞬时天气尺度扰动风（或位势高度、温度）的分量^[10]

$$V(\lambda, \varphi, t)_Y^* = V(\lambda, \varphi, t)_Y - [\bar{V}_t(\varphi)] - V_t^*(\lambda, \varphi) - [V(\varphi, t)]_Y^* \quad (1)$$

其中， $V(\lambda, \varphi, t)_Y$ 为大气观测的变量。 $[\bar{V}_t(\varphi)]$ 反映的是太阳辐射季节变化对应的第t日确定时刻的纬圈平均气候风。 $V_t^*(\lambda, \varphi)$ 是相对第t日确定时刻用第1年至第N年时间平均的空间格点风减去相对第t日太阳辐射对应的纬圈平均季节变化风分量 $[\bar{V}_t(\varphi)]$ 后的逐日确定时刻的空间气候风分布，它反映的是海陆、地形（包括局地环境）差异季节调节的逐日确定时刻的气候风。 $[\bar{V}_t(\varphi)]$ 和 $V_t^*(\lambda, \varphi)$ 之和为太阳季节辐射与海陆环境共同影响下的逐日确定时刻的气候风，可用过去历史资料确定。

$[V(\varphi, t)]_Y^*$ 是纬圈平均的行星尺度瞬变扰动风。它的分离方法是用全球观测的风先做行星尺度的纬圈平均，再减去气候对应日确定时刻的纬圈平均风。这一项与热带海洋或极地年代际、年际和季节内热力强迫引起的变化有关。分析对流层顶纬圈平均的行星尺度经、纬向风扰动在季节内和年际尺度上的变化，及其与厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）、北极涛动（AO）

和南极涛动（AAO）之间的关系表明：来自热带对流层顶的年际行星尺度纬向风扰动与赤道ENSO循环有联系，可以传播到副热带、中纬度和极锋对流层顶；来自热带对流层顶的季节内（40~60d）行星尺度纬向风扰动也可以传播到副热带和中纬度；来自两半球极地对流层顶的大气季节内行星尺度纬向风扰动可以向高纬度传播^[11]。可见， $[V(\varphi, t)]_Y^*$ 是随时间可以南北传播的大气行星尺度瞬变波动。

把大气变量物理解析后的天气尺度瞬变扰动量（如 $V(\lambda, \varphi, t)_Y^*$ ）绘制在天气图上称为“瞬变扰动天气图”。它与“传统天气图”上的变量不同的是，它不包含逐日的气候分量和逐日的行星尺度瞬变扰动分量。大量的个例分析得到，物理解析后的天气尺度瞬变扰动量绘制的天气系统多以涡旋的状态出现，而不是传统天气图上的波动状态^[12]。瞬变扰动天气图上呈现的系统具有立体的温压场与流场匹配的扰动结构。下面给出大气变量物理解析后瞬变扰动量在热浪、低温雨雪冰冻和台风强弱变化等分析中的表现。

3 热浪事件的瞬变扰动分析

利用区域热浪极端事件满足的条件，得到了1960—2008年发生在我国大陆的163个区域湿热浪事件和136个区域干热浪事件^[13]。区域干热浪满足的条件是：单站日最高气温高于常年值（常年值=当日前后5d，共11d的气候平均值）连续日数超过5d（其中有2d最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ ）；高温过程强度（过程平均温度距平的大小）排序大于第90个百分位值；在同一时间段内有相邻5站同时出现热浪。

2003年6月1日—8月20日，我国江南南部到华南中部的很多台站出现了20~50d的高温记录，比常年同期多5~20d。在四次热浪过程中，最强的过程出现在7月底—8月初。图1是2003年8月2日亚洲地区200和850hPa层的位势高度、温度和风的天气尺度瞬变扰动分布。200hPa正异常高度扰动和850hPa正异常温度扰动中心对应的地面附近为热浪发生区。

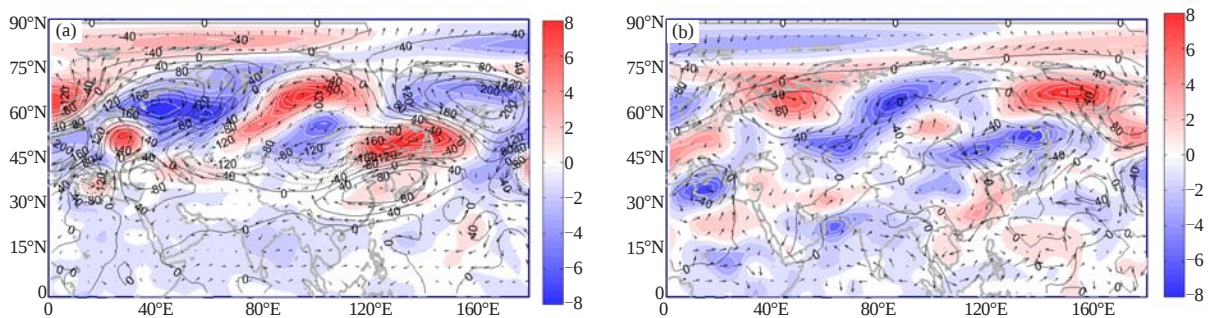


图1 2003年8月2日200 (a) 和850hPa (b) 位势高度扰动（实线，gpm）、温度扰动（彩色阴影，K）和风扰动（矢量）的分布

图2是经过江南热浪区上空的天气尺度瞬变扰动量在南北方向上的剖面分布。江南热浪发生在对流层高度扰动和温度扰动下延中心的位置。最强的高度扰动中心在150~250hPa层附近，温度扰动中心在400或850hPa层附近。对流层中上层的高度正异常中心对应异常高压区的下沉气流并引起中低层温度升高。大气高温扰动到达的地面为30°N以南的热浪区。在北方45°—50°N地区，地面出现了低温，在其高空平流层—对流层为高度扰动的负值区，对流层为温度扰动的负值区。可见，地面上出现的高温热浪区和低温区是与对流层，甚至平流层中的天气尺度瞬变扰动联系在一起的。这些瞬变扰动呈涡旋的环流特征并且在温压场上具有内在的物理联系，由此可用上部大气瞬变涡旋扰动指示地面热浪事件的发生位置。在原始观测的温压场和流场上，即在常规天气图上是难以清楚地分辨出这些扰动结构与热浪事件之间的对应位置关系的。

1979—2008年间，我国5—9月共有区域干热浪事件92次^[14]。去掉其中跨越5月1日的5次事件后，还有87次区域干热浪事件。在250hPa高度瞬变扰动场上，对应的87次区域干热浪，有4次事件没有高度扰动传播的前期信号。有高度扰动传播的其余83次热浪事件，按扰动信号的传播方向，可分为中纬度向东和低纬度向西移动的两类。大多数区域热浪的前期信号，是从中纬度由西向东传播的，占87场热浪事件的86.2%。天气预报包含了天气监测和天气预测两个方面。对流层大气中的这些扰动一旦出现后是要不断监测与跟踪的，它的未来动向是要根据其气候背景场的关系预测的。用欧洲中期天气预报模式的产品，模式对高度扰动具有提前1~7d的预报能力。利用大气

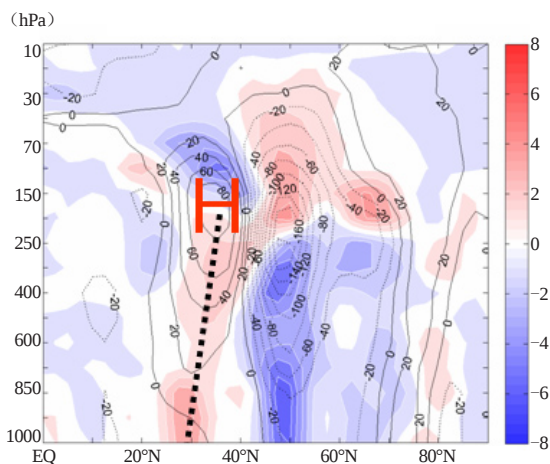


图2 2003年8月2日沿中国东部(110°—120°E)平均的南北剖面对流层—平流层位势高度扰动(实线, gpm)和温度扰动(彩色阴影, K)(粗点线指示高度扰动中心向下延伸并与温度扰动轴重合的线)

变量分解的前期信号与模式产品的扰动信号结合，热浪事件可以提前1~2周做出预报^[14]。

4 雨雪冰冻事件的瞬变扰动分析

1960—2008年冬季期间，我国南方发生了23次低温冰冻(冻雨)天气事件，其中满足站日数大于10的事件有11次。2008年初，我国南方发生了一场影响巨大的区域持续性低温冻雨天气事件。物理分解后的对流层低层冷空气扰动主体位于北非—阿拉伯地区，事件由4次冷空气扰动过程累加形成^[15]。第一次冷空气弱小，2008年1月12日从蒙古南下影响我国南方地区(图3a)。16日，第二次冷空气由蒙古南下影响我国南方，但在其后方有第三次和第四的冷空气来自北非—阿拉伯地区(图3b)。在我国南方地区(110°—120°E, 20°—33°N)高度—时间剖面图上，第二次至第四次冷空气过程最清楚(图3c)。低层冷空气位于850hPa以下，中层暖空气从600hPa逐渐上抬到300hPa，而在对流层顶(100~150hPa)一直维持着冷空气。在我国南方地区(100°—120°E, 20°—35°N)，对流层上层的冰晶下落到中层融化，再到低层冻结成冻雨下落到地面(图3d)。2008年1月的四次雨雪冰冻过程，是对流层低层大气中温度扰动随扰动涡旋沿一定的路径排列而来影响的结果。在分离出这些扰动涡旋后，预报员掌握它们的移动规律就可以提前做出区域雨雪冰冻事件的预报。这是雨雪冰冻事件预报的瞬变涡旋扰动法。

基于对2008年南方雨雪冰冻(冻雨)事件的分析 and 总结的瞬变涡旋扰动法，利用欧洲中期天气预报模式产品做物理分解，在2011年1月12日20时(北京时)的预报产品中，分析出了2011年1月16—21日850hPa上的温度扰动^[16]。利用数值预报产品做分解分析，实际提前4d预报出了中国南方雨雪冰冻(冻雨)的开始，提前9d预报出了雨雪冰冻(冻雨)天气过程的结束，以及提前13d预报出了当月的第三次雨雪冰冻天气过程。欧洲中期天气预报产品中的低层大气温度扰动，与实际观测的低温扰动有较好的一致性。欧洲中期天气预报模式中的天气尺度温度扰动分量信息，即850hPa层的低温扰动和对流层垂直“冷—暖—冷”的结构对冻雨天气过程出现的可能性，具有提前一周左右的预报能力。

5 台风登陆前增强的气候分析

我国是受南海和西北太平洋台风影响的国家，通常台风到达我国近海后由于地形摩擦作用都会减弱，但有些台风到达我国近海后还会增强。近海增强的台

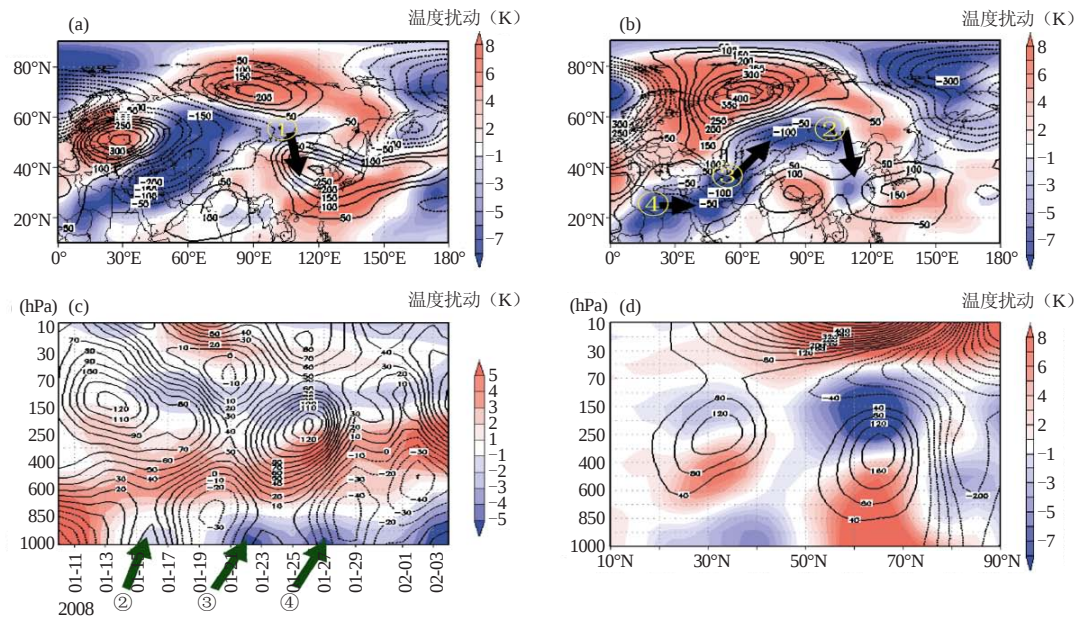


图3 2008年1月我国南方雨雪冰冻期间的高度扰动(实线, gpm)和温度扰动(彩色阴影, K): 2008年1月12日(a)和16日(b) 300hPa高度扰动和850hPa温度扰动; 2008年1月10日—2月4日中国南方(100°—120°E, 20°—33°N)地区高度扰动和温度扰动在垂直方向上随时间的变化(c)和2008年1月25—29日中国中东部(100°—120°E平均)地区南北(10°—90°N)方向上高度扰动和温度扰动的垂直剖面(d)(箭头和数字指示扰动过程)

风大多数位于海南岛与台湾岛之间的近海海域。近50年(1961—2010年)总共236个到达华南近海的热带风暴中,有22个台风登陆前发生了明显的增强,其中有15个增强台风发生在9月^[17]。为了探索华南近海台风增强的季节锁相原因,在文献[17]中用美国再分析资料进行了大气变量的四分量物理分解。

利用多年原始大气变量去除行星尺度纬圈平均的气候,得到海陆分布调节的气候场,它能够很好地反映台风强度变化的气候背景。从第28候南海季风爆发一直到第43和44候,东亚副热带季风槽位置都是逐候向北移动的^[16]。但过了第44候,东亚副热带季风槽逐候向南移动。第49候,东亚副热带季风槽到达华南。第50候,东亚副热带季风槽南退到华南沿海,并在华南近海稳定少动。图4是东亚副热带季风槽在华南近海最深的时段(第53候)。孟加拉湾季风槽是长期存在的。南海南北向的季风槽从盛夏就存在,位置少动,但气旋性涡度不及东亚副热带季风槽。第53候是华南近海台风增强次数最多的时期,也是华南近海气候上降水最多的时期。这个时候当有台风进入华南近海后,会在这里叠加上近海的气候槽气旋性涡度,使得台风增强。根据台风的形成理论,华南近海低层的气候气旋性涡度有利于水汽辐合,增加台风降水和潜热释放。这一气候辐合作用有利于台风在华南近海增强。

台风强度变化是短期和中期预报的内容。实际上,要做好这个时间段的预报,气候分析是基础。传统天气图上,台风是作为质点在观测气流的作用下移

动的。对每一个具体的台风质点,它到达南海时的未来移动要同时受到逐日气候环流的作用和物理解析后瞬变天气尺度扰动气流的作用,而瞬变天气尺度扰动气流又受到逐日气候气流的作用。逐日气候气流和瞬变扰动气流,它们共同决定了台风的未来发展。

6 结束语

长期以来,基于天气图的天气预报方法是“槽来脊去”的长波波动法,数值天气预报在大型计算机的帮助下能够同时运算几百个不同尺度的波动。所以,常规天气图和数值天气预报采用的是波动法。Rossby长波反映的本质是旋转地球上扰动的惯性振荡。但

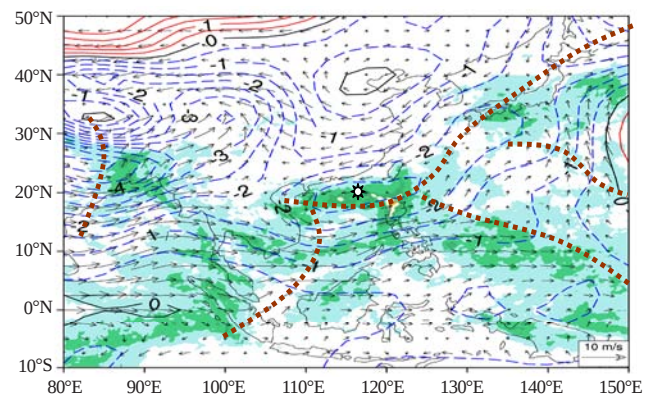


图4 第53候(9月21—25日) 850hPa风(m/s)和位势高度(dagpm)时间平均的海陆季节调节非对称部分[阴影为气候降水量(颜色由浅至深,由绿变黄分别表示5, 10, 15, 20, 25mm/d),点线为气候槽,符号☆指示一个到达气候槽上的台风]

是, 旋转地球自由大气中的惯性振荡还受到太阳辐射加热的年循环影响和海陆热力气候调节的影响。对观测的大气变量去除这两种气候影响和纬圈平均瞬变扰动的影响, 则余留的大气瞬变扰动量中已没有了长波, 而是一些天气尺度瞬变涡旋扰动。

任何一个大气变量的瞬时观测场都可以物理分解成逐日气候分量、行星尺度瞬变扰动分量和天气尺度瞬变扰动分量。在未来的演变中, 它们之间会发生相互作用。但在不太长的时间内, 前者对后者的作用是可以定性估计的。在台风是否转向和强度变化的预报中, 逐日气候场、行星尺度扰动场、天气尺度扰动场和台风, 它们四者之间存在时空尺度上的差异, 但主要是前者影响后者。这种有层次的作用关系可以更好地把握台风的未来强度和位置变化。

观测大气变量物理分解后的第四部分扰动分量可以从原始观测资料中显现出来, 方便监测、跟踪和预报。这些瞬变涡旋扰动是相对逐日气候和行星尺度瞬变扰动的距平, 是一些异常的高值与低值系统。这些扰动系统的强弱、稳定和持续时间与极端天气事件(暴雨、热浪、低温、冰冻、干旱)有直接的联系。预报员能够做的工作就是从原始观测变量中分离出正常的逐日气候、异常的行星尺度瞬变扰动和异常的天气尺度瞬变扰动, 预报瞬变扰动对应的极端天气事件。气象业务部门对外发布的天气预报中包含有正常的气候和异常的天气。

参考文献

- [1] Rossby C G, et al. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Marine Res*, 1939, 2: 38-55.
- [2] 顾震潮. 天气数值预报中过去资料的使用问题. *气象学报*, 1958, 29(3): 176-184.
- [3] 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. *中国科学*, 1974, 17(6): 635-644.
- [4] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. *Science*, 2009, 325: 1114-1118.
- [5] Schlesinger M E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, 1994, 367: 723-726.
- [6] Scafetta N, West B J. Is climate sensitive to solar variability? *Phys Today*, 2008, 3: 50-51.
- [7] 钱维宏. 认识气候及其变化. 气象科技进展, 待发表.
- [8] Starr V P, White R M. Balance Requirements of the General Circulation. Cambridge: Air Force Cambridge Research Center, 1954.
- [9] 钱维宏. 天气尺度瞬变扰动的物理分解原理. *地球物理学报*. 2012, 55(5): 1439-1448.
- [10] 钱维宏. 基于大气变量物理分解的低温雨雪冰冻天气的中期预报系统和方法. 中华人民共和国国家知识产权局, CN10222174A, 2011.10.19.
- [11] 钱维宏, 梁浩原. 行星尺度纬圈平均风扰动的传播与南北极扰动. *科学通报*, 2012, 57(15): 1326-1333.
- [12] 钱维宏. 中期延伸期天气预报原理. 北京: 科学出版社, 2012.
- [13] Ding T, Qian W H. Geographical patterns and temporal variations of regional dry and wet heatwaves in China during 1960-2008. *Adv Atm Sci*, 2011, 28(2): 322-337.
- [14] 丁婷, 钱维宏. 中国热浪前期信号及其模式预报. *地球物理学报*, 2012, 55(5): 1472-1486.
- [15] 钱维宏, 张宗婕. 南方持续低温冻雨事件预测的前期信号. *地球物理学报*, 2012, 55(5): 1501-1512.
- [16] 钱维宏. 气候变化与中国极端气候事件图集. 北京: 气象出版社, 2011.
- [17] 陆波, 钱维宏. 华南近海台风突然增强的初秋季节锁相. *地球物理学报*, 2012, 55(5): 1523-1531.

会议信息

- ◆ 第三届国际北极研究学术会 (Third International Symposium on the Arctic Research, ISAR-3), 2013年1月14—17日, 日本, 东京 (<http://www.jcar.org/isar-3/index.html>)
- ◆ 世界雪论坛 (World Snow Forum), 2013年1月17—20日, 俄罗斯, 新西伯利亚 (<http://www.worldsnowforum.org/en/>)
- ◆ 第23和24太阳活动周之间延伸太阳极小的原因和结果会议 (Causes and Consequences of the Extended Solar Minimum Between Solar Cycles 23 and 24, 4CESM), 2013年4月8—12日, 美国, 弗洛里达, Key Largo (<http://chapman.agu.org/solarminimum/>)
- ◆ 第十二届极地气象和海洋学术会 (12th Conference on Polar Meteorology and Oceanography), 2013年4月29—5月2日, 美国, 西雅图 (<http://www.ametsoc.org/MEET/fainst/201312polarocean.html>)
- ◆ 第四届全球灾害风险降低平台会议 (Fourth Session of the Global Platform for Disaster Risk Reduction), 2013年5月19—23日, 瑞士, 日内瓦 (<http://www.preventionweb.net/globalplatform/2013/contact>)
- ◆ 第六届雾、雾收集器和露国际会议 (6th International

Conference on Fog, Fog Collection and Dew), 2013年5月19—24日, 日本, 横滨 (<http://www.fogconference.org/>)

- ◆ 第七届欧洲强风暴会议 (7th European Conference on Severe Storms, ECSS 2013), 2013年6月3—7日, 芬兰, 赫尔辛基 (<http://www.essl.org/>)
- ◆ 第十九届大气和海洋流体力学学术会 (19th Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics), 2013年6月17—21日, 美国, 罗得岛州, Newport (<http://www.ametsoc.org/MEET/fainst/201319fluid.html>)
- ◆ NCCR夏季气候学校 (NCCR Climate Summer School), 2013年9月1—6日, 瑞士, Grindelwald, Bern, (http://www.nccr-climate.unibe.ch/summer_school/2013/)
- ◆ 2013年EUMETSAT/AMS联合卫星会 (2013 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference & 19th American Meteorological Society AMS Satellite Meteorology, Oceanography, and Climatology Conference), 2013年9月16—20日, 奥地利, 维也纳 (http://www.eumetsat.int/Home/Main/News/Conferences_and_Events/820209?l=en)