

一次寒潮中期过程的能量学分析

张 瑞 桂

(福建省气象台)

提 要

本文利用波数域能量方程, 诊断分析1986年2月下旬—3月初在福建出现的一次强寒潮中期天气过程, 揭示了过程的能量学特征; 并分析不同纬带间长波、超长波的相互作用与寒潮中期过程的关系, 为预报南方寒潮提供一些线索和依据。

一、资料和计算公式

本文利用欧洲中心1986年2月10日—3月5日北半球500百帕20—65°N范围内逐日20时每隔5个经纬度的高度资料, 选取45—60°N为第一纬度带, 25—45°N为第二纬度带, 所用方程为:

1. 平均动能 $K(0)$ 的变化率方程^[1]

$$\frac{\partial K(0)}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} M(n) + \sum_{n=1}^{\infty} F(n) + C(0) - D(0) \quad (1)$$

其中 $M(n)$ 为 n 波向纬向平均气流的动能输送; $F(n)$ 为 n 波与平均气流相互作用产生的净边界通量; $C(0)$ 为平均有效位能向平均动能的转换; $D(0)$ 为平均动能的摩擦耗散。

$$M(n) = \frac{2\pi a}{g} \int_{\phi_S}^{\phi_N} \overline{u'v'(n)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\overline{u}}{\cos \phi} \right) \cos \phi d\phi$$

$$F(n) = -\frac{2\pi a}{g} \left[\overline{u'v'(n)} \cos \phi \right]_{\phi_S}^{\phi_N}$$

式中的 a 为地球半径, ϕ_S 、 ϕ_N 分别为该纬度带的南北界, u 和 v 为地转风纬向分量和经向分量。

2. n 波动能 $K(n)$ 的变化率方程

$$\partial K(n)/\partial t = -M(n) + L(n) + BL(n) + C(n) - D(n) \quad (2)$$

其中 $L(n)$ 为通过波与波的非线性相互作用 n 波得到的动能; $BL(n)$ 为波与波相互作用产生的净边界通量; $C(n)$ 为 n 波涡动有效位能向涡动动能的转换; $D(n)$ 为 n 波涡动动能的摩擦耗散; n 为沿纬圈的波数, 计算时取至 10。

应当指出, 方程(1)中与温度和垂直速度有关的 $C(0)$ 和耗散项 $D(0)$ 未计算, 所以实际上只讨论 $M(n)$ 与 $F(n)$ 两项的作用。(2)式中的转换项 $C(n)$ 和耗散项 $D(n)$ 也未计算, 只把 $C(n) - D(n) = R(n)$ 作为余项来估计, 当然 $R(n)$ 也包括其他未计算的小项和计算误差, 但是由于 $D(n)$ 是耗散项, 恒为负值, 所以当 $R(n)$ 为较大正值时, 可以推断 $C(n)$ 应为正贡献。因此 $R(n) \gg 0$ 表示有效位能向动能转换, 即 $P(n) \rightarrow K(n)$ 。反之, $R(n) \ll 0$ 表示 $K(n) \rightarrow P(n)$ [2]。

二、环流形势与能量特征

要利用波数域能量方程来研究天气形势变化的机制, 就必须把天气形势的变化与特征波的能量变化相互联系起来。

我们根据 500 百帕北半球环流形势及其能量变化特征, 将这次寒潮中期过程划分为以下 3 个阶段:

1. 初始阶段(2月11日—22日)

约在寒潮爆发前半个月, 北半球倒 Ω 流型开始建立, 14 日两大洋脊发展到最强, 极涡分别位于北美洲和东欧地区, 形势十分稳定(图 1a)。19 日北半球环流形势发生突变, 超长波系统开始调整, 原位于大西洋的高压迅速西退至格陵兰附近, 从而引起大西洋—欧洲沿岸低槽形成并强烈发展, 欧洲长波脊新生(图 1b)。在这阶段中, 第一纬带平均动能 $K(0)$ 经历了两次增衰过程(图 2), 18 日增至最大值 $(5.341 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^2)$, 2 波动能始终占优势(图 3a), 并经历了三次增长过程。从 $K(2)$ 和 $K(0)$ 的变化曲线可知, 2 月 14 日 2 波发展到最强 $(7.228 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^2)$, 与初始阶段两大洋脊发展到最强盛相对应, 2 月 18 日 $K(0)$ 和 $K(2)$ 同时达到峰值, 19 日两曲线又同时下降。

当 $K(0)$ 第二次开始衰减或 $K(2)$ 曲线升到第三次峰点时, 标志本阶段以 2 波为主的形势基本结束。

2. 酝酿阶段(2月23日—26日)

约在寒潮爆发前 3—4 天, 欧洲长波脊东移至乌拉尔山东侧后逐渐发展加强, 并在其南侧维持一横槽, 锋区缓慢南压, 此时美洲东部高脊发展。原来一直稳定在北太平洋—阿拉斯加的高脊西退至鄂霍茨克海地区, 从而使乌拉尔山东部高脊与鄂霍茨克海高脊构成了东亚倒 Ω 流型。整个北半球呈四波型(图 1c)。这时第一纬带 $K(0)$ 曲线持续下降; $K(2)$ 开始迅速下降; $K(4)$ 出现明显的上升, 25 日达到峰值 $(4.328 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^2)$, 产生 $K(4)$ “脉冲”。

在后期, 第一纬带 $K(0)$ 和 $K(2)$ 持续衰减, $K(3)$ 由降转升, 标志着本阶段结束。

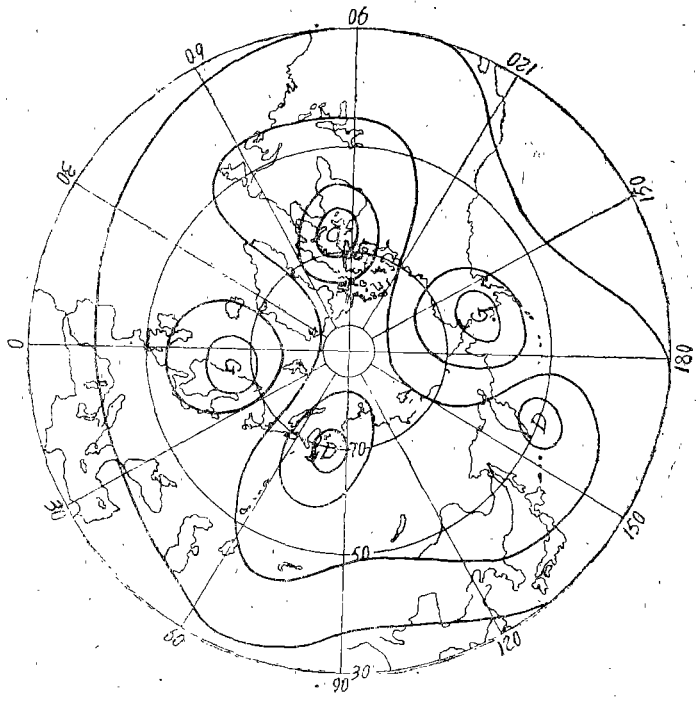


图1 a 2月14日20时

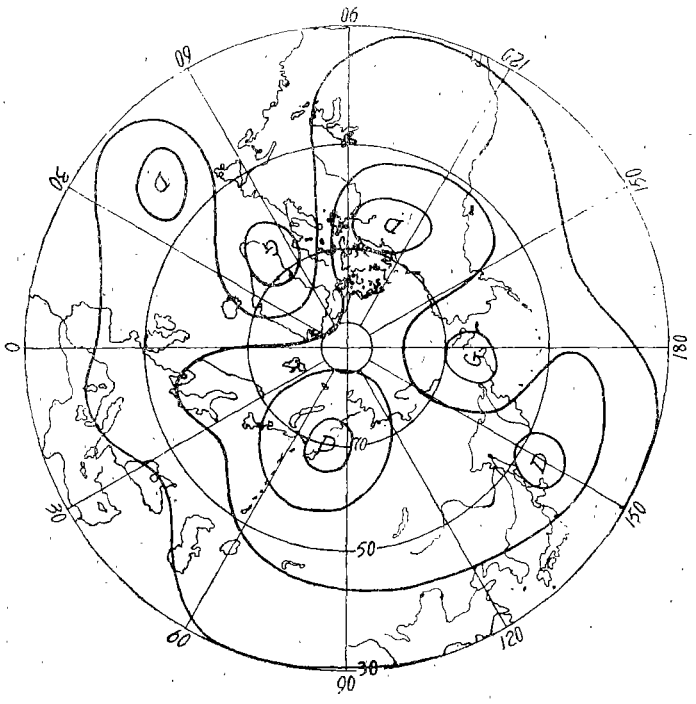


图1 b 2月19日20时

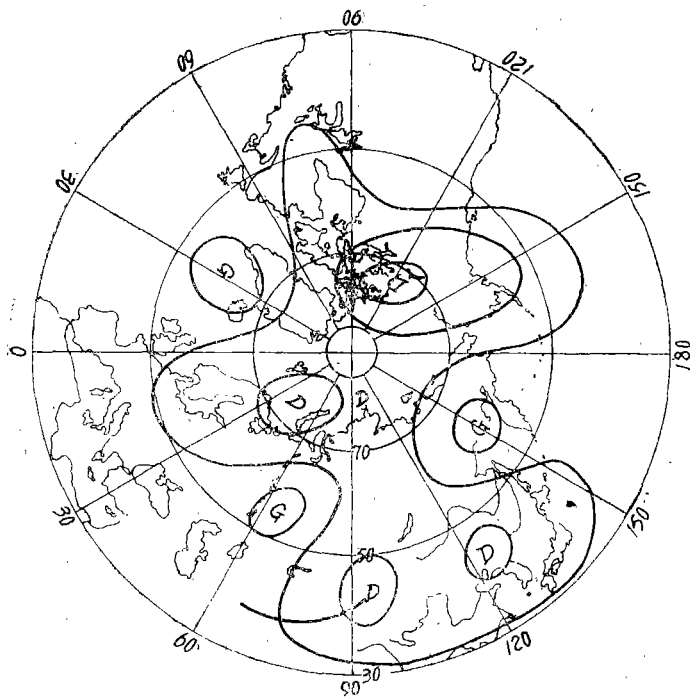


图1c 2月25日20时

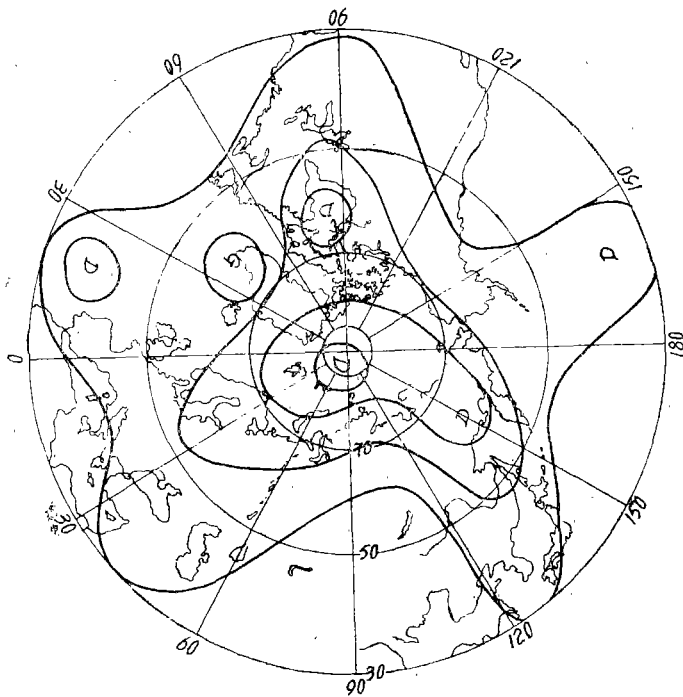


图1d 3月1日20时

图1 北半球500百帕高度图

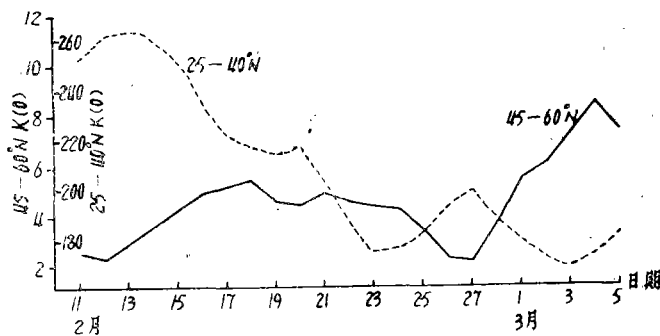


图2 1986年2月下旬寒潮中期过程 $K(0)$ 随时间的变化
单位: $10\text{m}^2/\text{s}^2$

带 $K(0)$ 上升到峰值后迅速下降。而第一纬带 $K(0)$ 下降到谷值后迅速上升; $K(2)$ 持续下降; $K(3)$ 迅速上升为优势波, 3月1日达到峰值($3655 \times 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}^2$); $K(4)$ 显著下降。第二纬带 $K(5)$ 由降转升, 并于3月1日达到峰值($3704 \times 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}^2$), 成为优势波, 而 $K(1)$ 由升转降(图3b)。这个阶段的特点: $45-60^\circ\text{N}$ 纬带从4波调整为3波, $25-40^\circ\text{N}$ 纬带从1波调整为5波, 整个环流发生急剧变化。

3. 爆发阶段(2月27日—

3月1日)

这阶段大气环流发生了显著的变化, 西风指数由高指数迅速转变为低指数, 亚洲急流南移并增强(图略)。鄂霍茨克海高压西退并迅速减弱, 乌拉尔山东侧高脊东移发展, 横槽转向, 东亚大槽建立, 整个北半球为三波流型(图1d)。这期间第二纬

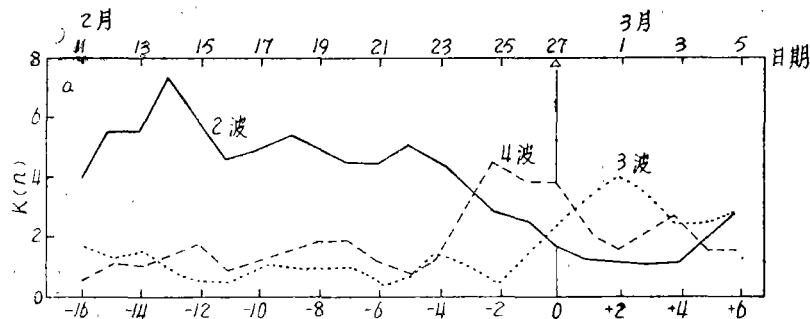


图3a 寒潮中期过程2、3、4波 $K(n)$ 随时间的变化($45-60^\circ\text{N}$) 单位: $10\text{m}^2/\text{s}^2$
0为寒潮爆发日, 其前后天数分别以-、+数表示

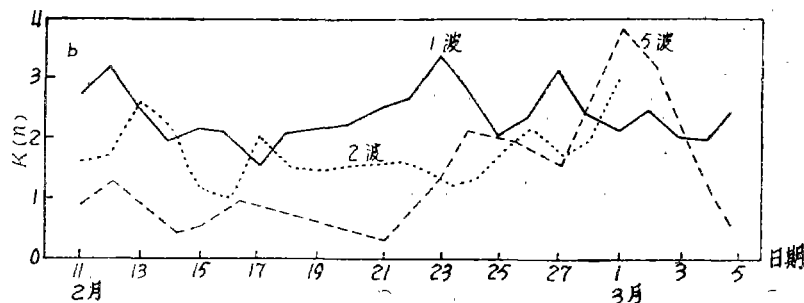


图3b 寒潮中期过程1、2、5波 $K(n)$ 随时间的变化($25-10^\circ\text{N}$) 单位: $10\text{m}^2/\text{s}^2$

上述各阶段的能量特征同以往有关寒潮天气过程的研究结果一致。如文献[2]指出寒潮中期过程是从北半球倒 Ω 流型的建立开始的, 这就同初始阶段西风带2波动能的增

长相对应。东亚寒潮在天气过程上表现为东亚大槽的重建，这同3波动能在酝酿阶段较弱，到爆发阶段则迅速增强相对应。

三、寒潮中期过程能量变化的机制

1. 初始阶段能量变化的机制

寒潮中期过程是许多波动相继增衰所构成的特定关系的变化过程，作为与两大洋脊发展紧密相关的2波动能在寒潮开始阶段经历了三次比较明显的增长过程。我们主要考察2月11日—14日和20日—22日两次K(2)的变化。由(2)得(n=2)

$$11-14日: 84 \sim 4641 + 4301 + 5614 - 14472 \text{ (单位: } 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}^3, \text{下同)}$$

$$20-22日: 25 \sim -34 + 2100 - 2672 + 630$$

由以上结果可知，11日—14日，过程开始时K(2)的增长主要是正压非线性项BL(2)的贡献，其次是纬圈平均气流向2波输送了动能。20日—22日，由R(2)所反映出来的斜压转换比起正压转换小一个量级。所以这阶段K(2)的增长主要是正压非线性项L(2)的贡献，即在正压转换中波与波的相互作用更为重要。

由此可见，寒潮初始阶段正压贡献对2波的增长较为重要，其主要因子有时是L，有时是BL。

2. 酝酿阶段能量变化的机制

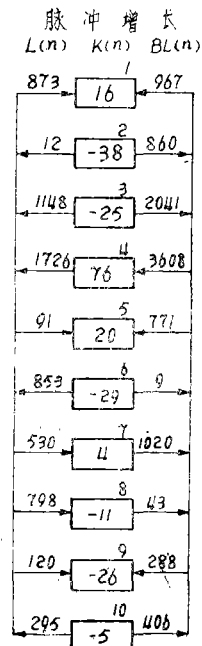
(1)长波脉冲的能量变化 对应于乌拉尔山东部高脊建立的特征波为4波，这种对应关系已由纬圈谱脊线位置作了验证。通过计算知4波的第一波脊位于73°E，并于25日迅速增强至峰值(4328×10⁻²m²/s²)。由(2)得(n=4)

$$24-25日: 76 \sim -229 - 1726 + 3608 - 1577$$

由上看出，K(4)的增长主要是正压转换中BL(4)的贡献。从图4可知：脉冲波的迅速增长主要是由于正压非线性作用引起的净边界通量使4波从其他波获得动能，而2、3、7波通过非线性作用输出动能。根据Fjørtoft的理论研究结果可知，能量再分配只能是K_超→K_长←K_短或K_超←K_长→K_短两种方式之一。因此超长波(2、3波)和长波(6、7、8波)及短波(10波)通过边界作用向其它波输送动能，有一部分供给了长波(4、5波)。证实长波脉冲增幅是由于波与波之间非线性相互作用，通过边界通量使动能转换的结果。

图4 4波发展期间(24—25日)60—45°N正压转换能流图(单位: 10⁻⁷m²/s³)

长方块内的数值为各波数的正压能量的得失



(2) $K(2)$ 的衰减 $K(2)$ 明显衰减是本阶段的重要特征。由(2)得

$$23-26日: -101 \sim 114 + 1259 - 3784 + 2311$$

据考察这阶段 $K(2)$ 的衰减明显是由 $BL(2)$ 引起。可见在寒潮酝酿阶段, $K(4)$ 和 $K(2)$ 的增衰都是由于正压非线性项 BL 的作用。

3. 爆发阶段能量变化的机制

长波“脉冲”和 3 波重建是东亚寒潮爆发前后的两个重要特征。下表为寒潮爆发期间(2月27日—3月1日)2、3、4波能量增衰的各项变化值(单位: $10^{-7}m^2/s^3$)。

波数	项 目	$\frac{\partial K(n)}{\partial t}$	$-M(n)$	$L(n)$	$BL(n)$	$R(n)$
2	波	-27	266	1 057	-4 433	3 084
3	波	78	-278	-1 775	432	1 698
4	波	-120	-6	-2 931	5 560	-2 743

从表中看出: 这阶段 $K(4)$ 的衰减主要是由于正压转换中波与波的非线性项 $L(n)$ 的作用; $K(2)$ 的衰减主要是由于非线性项的净边界通量项 $BL(n)$ 的作用; 而 $K(3)$ 的增长则是以 $R(3)$ 反映出来的绝热、斜压转换为主。由第一节分析得知: 余项 $R(n)$ 为大的正值意味着转换项 $C(n)$ 为正贡献, 这说明寒潮爆发阶段 3 波能量来自波动有效位能向波动动能的转换及非线性项的净边界通量项。通过分析得知, 3 波动能的增长是通过边界通量的作用从 2 波获得, 这表明此寒潮过程是在 2 波动能不断下降、3 波动能迅速增长的特征下爆发的。

4. 不同纬带的相互作用及其能量转换

(1) 西风带系统对低纬环流的影响 从第二纬带 $K(0)$ 曲线变化可知, $K(0)$ 分别在 19 日—20 日和 23 日—27 日经历了两次增长过程。第一次增长正好与第一纬带 $K(0)$ 第一次衰减时期相对应。这阶段 $K(0)$ 的增长主要是 $F(1)$ 、 $F(3)$ 和 $F(4)$ 的贡献。第二次增长正好与第一纬带 $K(0)$ 的第二次衰减相对应, 即寒潮爆发, $45-60^\circ N$ 纬带释放能量, 从而使 $25-40^\circ N$ 纬带获得能量。而这期间 $K(0)$ 的增长主要是 $F(1)$ 、 $F(4)$ 和 $F(6)$ 对平均动能的输入(图略)。以上情况表明: 西风带超长波系统调整对低纬环流有一定的影响。

(2) 超长波与长波 $K(n)$ 的转换 从图 3b 看出: 27 日以前, 第二纬带 1 波动能一直占优势, 5 波动能较弱。28 日起以 5 波动能迅速增长、1 波动能明显衰减为主要特点, 此时 2 波动能也开始增长。这些特征正好与第一纬带 2 波转 3 波的情况相对应。由(2)得

$$2月27日-3月1日5波: 118 \sim -984 - 445 + 1499 + 48 \quad (25-40^\circ N)$$

$$2波: 63 \sim -862 - 1511 + 4594 - 2158 \quad (25-40^\circ N)$$

$$2波: -27 \sim 266 + 1057 - 4433 + 3084 \quad (45-60^\circ N)$$

从上可知：两纬带长波、超长波动能的得失都是由于正压非线性边界通量项BL所引起。这可能是由于第一纬带环流从2波调整为3波型时，2波能量大量释放后，通过两纬度带边界 40°N 处波与波的相互作用向第二纬带2、5波输送能量通量。这就显示第一纬带2波对第二纬带2、5波的能量频散作用；同时第二纬带5波动能也从同纬带1波输送的动能获得增长(图略)。这时第二纬带5波是造成我国东亚寒潮天气过程的直接原因。

四、小 结

1. 寒潮中期过程是北半球大气环流中期变化的一种大型天气过程，西风带超长波环流形势的调整、长波系统的新生与发展是造成东亚寒潮中期过程的一种重要环流背景。通过对寒潮中期过程的能量诊断分析，有助于对大气环流中期变化的进一步认识。

2. 从能量转换看，寒潮中期过程的不同阶段具有不同的特点：在初始阶段，对于2波动能的生长正压过程较为重要，主要是L或BL的作用。在酝酿阶段，2、4波动能的增衰是正压非线性项BL作用的结果。寒潮爆发时，2波动能的衰减是由于BL项的作用，3波动能增长则主要来自斜压过程有效位能向动能的转换。

3. 寒潮中期过程相邻两纬带的 $K(0)$ 变化基本呈反位相关系。尤其是寒潮爆发阶段，波与波的非线性相互作用对各特征波之间的相互联系有重要贡献。这种相互作用不仅导致同一纬带内不同尺度波动能量的相互传递，而且也导致不同纬带间的扰动能量的相互传递。

黄文堂工程师对本工作予以大力支持，并提出许多宝贵意见，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 赵其庚、仇永炎，从500毫巴正压能量学来研究大气环流由夏到冬的季节变化，全国寒潮中期预报文集，77—78，北京大学出版社，1984。
- [2] 仇永炎等，中期天气预报，196页，科学出版社，1985。

AN ENERGITICAL ANALYSIS OF A COLD WAVE AT ITS MIDDLE STAGE

Zhang Ruigui

ABSTRACT

A diagnostic analysis is made on the weather regime at the middle stage of a severe cold wave occurring from late February to early March, 1986 by using the wavenumber domain energy equation. The energetical characteristic features are thus revealed in the process of the weather event. The analysis on the relation of the interaction between the long waves and ultra-long waves at different latitudes to the cold wave at its middle stage provides clues and criterions for the cold wave prediction in South China.