

傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2012. 2004 年冬季风期间一次强寒潮过程的能量收支研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 549–562, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10114. Fu Shenming, Zhao Sixiong, Sun Jianhua, et al. 2012. Energy budget of a cold surge process during the winter monsoon period of 2004 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 549–562.

2004 年冬季风期间一次强寒潮过程的能量收支研究

傅慎明¹ 孙建华¹ 赵思雄¹ 齐琳琳²

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

摘要 利用 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 的 NCEP 再分析资料和常规站点观测资料对 2004 年 12 月 28~31 日的一次强寒潮、冷涌过程作了研究, 研究结果表明: (1) 此次强寒潮事件在我国南海引发了强烈的冷涌, 该支冷涌一直向南越过赤道影响南半球。大尺度环境场有利于此次寒潮、冷涌事件的爆发, 本次寒潮属于“横槽转竖型”, 其中 200 hPa 的西风带大槽经历了一次调整, 500 hPa 经历了一次明显的横槽转竖过程, 对流层低层蒙古高压稳定维持, 其东侧的偏北大风是冷空气南下的有利条件。(2) 此次寒潮大风区内的动能制造以正压动能制造和斜压动能制造为主, 寒潮爆发初期, 以正压制造过程为主, 此后, 由于有效位能释放的作用增强, 斜压制造过程与正压制造强度相当, 大风区随着动能制造的增强而增强; 当斜压、正压动能制造均减弱, 大风区亦随之减弱。(3) 有效位能收支表明, 整层有效位能的释放与大风区相对应, 有效位能的释放有利于寒潮、冷涌的维持。寒潮大风区内, 对流层高层受有效位能释放的影响最大, 有效位能和风能可以互相转换; 对流层中层所受的影响最小, 且以风能向有效位能转换为主; 对流层低层则以有效位能向动能转化为主, 十分有利于低层风速的增大和维持。

关键词 寒潮 冷涌 有效位能 动能收支 斜压能量转换 正压能量转换

文章编号 1006-9585 (2012) 05-0549-14

中图分类号 P458.1+22

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10114

Energy Budget of a Cold Surge Process during the Winter Monsoon Period of 2004

FU Shenming¹, ZHAO Sixiong¹, SUN Jianhua¹, and QI Linlin²

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Institute of Aeronautical Meteorology and Chemical Defense, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100085

Abstract Based on 6-hour reanalysis data with $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ resolution from NCEP and station observed data, a cold surge during 28–31 Dec 2004 was analyzed, showing the following results: (1) During this period, the cold surge moved southward, crossed the equator and influenced the weather of the southern hemisphere. The background circulation was favorable for the breakout of the cold surge: A combination of two troughs in the westerly at 200 hPa and a transversal trough that transformed to a normal one at 500 hPa, which categorized this cold surge as a “transversal trough” type. The Mongolia high remained quasi-stationary, and the strong north wind to the east of it was favorable for the cold surge breakout. (2) The kinetic budget shows that the barotropic kinetic genesis (BTG) and baroclinic kinetic genesis (BCG) are the most important terms of the kinetic budget equation. Initially, the BTG term was dominant; later, the influence of the BCG term increased to equal that of the BTG. After 31 Dec, the kinetic genesis and strong wind zone both decreased obviously. (3) The available potential energy (APE) budget indicates a good correlation between the release of APE and

收稿日期 2010-09-01 收到, 2012-05-28 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421401, 国家自然科学基金资助项目 40875021、40620120437

作者简介 傅慎明, 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事于中尺度气象学、灾害天气动力学及数值模拟研究。E-mail: fusm@mail.iap.ac.cn

the wind at 850 hPa. The release of APE was favorable for the wind increase at low tropospheric levels and influenced mostly the high levels while having only a slight influence on the middle levels of the troposphere.

Key words cold wave, cold surge, available potential energy (APE), kinetic energy budget, baroclinic kinetic genesis (BCG), barotropical kinetic genesis (BTG)

1 引言

寒潮又称寒流是我国一种多发的灾害天气，我国中央气象台规定，凡一次冷空气侵入后，该地区 24 h 降温 10 ℃以上，且最低温度低于 5 ℃称为寒潮。寒潮可以引发冷涌（又称冬季风潮）过程，Lau et al. (1983) 给出冷涌的条件：(1) 南海北部 ($15^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 115^{\circ}\text{E}$) 区域平均的地面北风分量不低于 8 m/s; (2) 在条件(1)出现之前 0~24 h 内，香港 (22.64°N , 113.9°E) 和定点 (30°N , 115°E) 之间地面气压差不少于 8 hPa。同时满足上述两个条件便可以称之为冷涌爆发。关于寒潮和冷涌，很多学者作了研究：周学群 (1989) 利用两次船舶航行实测资料研究了两次冷涌的时空结构，证实了冷涌的重力波特征；杨松和朱乾根 (1989) 利用 1982 年 12 月下旬一次冷涌过程的数值试验结果分析了冷涌的结构和冷涌期中低纬环流的相互作用；张元箴等 (1993) 通过分析冷涌到达低纬后引起的大气环流变化讨论了冬季中、低纬度天气系统之间的相互作用；张韧和张为付 (1994) 利用一个部分非线性的二维经向重力内波模式研究了冬季风期间南海冷涌的传播形式；Davis (1995) 利用数值模式研究了一次中尺度的冷涌过程；张敏锋等 (1998) 利用有限区域数值模式对 1979 年 1 月的寒潮过程作了模拟研究；Chen et al. (2002) 研究了一次影响台湾的冷涌过程；Chen et al. (2004) 的研究表明冷涌活动在 El Niño 的暖冬更容易发生；赵思雄和曾庆存 (2005) 对 2005 年 1 月初一次越过赤道并影响南半球天气的强冷空气过程作了深入分析，揭示出了一些新的事实；王遵娅和丁一汇 (2006) 研究了近 53 年来寒潮的变化特征及其可能原因；丁一汇和马晓青 (2007) 对 2004 年 12 月 22 日~2005 年 1 月 1 日的强寒潮事件进行了等熵位涡分析，指出该次寒潮过程冷空气来自高纬平流层下部和对流层上部；钱维宏和张玮玮 (2007) 研究了我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖的关系。寒潮和冷涌的爆发往往与风速的急剧增大相联系，

然而，到目前为止，有关寒潮、冷涌过程中能量收支的研究开展尚少，寒潮和冷涌过程的能量特征并不十分清楚，鉴于此，本文选取 2004 年 12 月 28~31 日的一次强寒潮、冷涌过程进行了能量的收支分析，研究了寒潮和冷涌过程中的能量转换过程。

2 资料和方法

本文利用了 6 h 一次 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 的 NCEP 再分析资料和常规地面观测资料对本次寒潮过程进行分析。由于寒潮爆发过程中往往伴随着风速的急剧增大，因而本文分析的主要方法是动能收支和有效位能收支。利用动能收支可以揭示出风场变化动能的主要来源，利用有效位能收支可以揭示斜压的能量转换过程。

动能收支采用了 Chen et al. (1978) 建立的动能收支方程，如下：

$$\begin{aligned} \frac{1}{sg} \int_0^{p_0} \iint_s \frac{\partial k}{\partial t} dsdp &= -\frac{1}{sg} \int_0^{p_0} \iint_s \nabla_h \cdot (\mathbf{V}_\psi k) dsdp - \\ &\quad \frac{1}{sg} \int_0^{p_0} \iint_s \nabla_h \cdot (\mathbf{V}_x k) dsdp - \frac{1}{sg} \int_0^{p_0} \iint_s \frac{\partial(\omega k)}{\partial p} dsdp - \\ &\quad \frac{1}{sg} \int_0^{p_0} \iint_s \mathbf{V}_\psi \cdot \nabla_h \varphi dsdp - \frac{1}{sg} \int_0^{p_0} \iint_s \mathbf{V}_x \cdot \nabla_h \varphi dsdp - D(k), \quad (1) \\ \mathbf{V} &= \mathbf{V}_\psi + \mathbf{V}_x, \\ k &= \frac{1}{2} \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{V}_\psi \cdot \mathbf{V}_\psi + \frac{1}{2} \mathbf{V}_x \cdot \mathbf{V}_x + \mathbf{V}_\psi \cdot \mathbf{V}_x, \end{aligned}$$

其中， s 为水平积分面积， g 为重力加速度， k 为单位质量气块的动能， \mathbf{V}_ψ 为旋转风， \mathbf{V}_x 为辐散风， ω 为 p 坐标系下垂直速度， p_0 为地面气压， φ 为位势。方程组(1) 中各项物理意义如下： $-(1/s) \int_0^{p_0} \iint_s \nabla_h \cdot (\mathbf{V}_\psi k) dsdp$ 为旋转风动能通量散度，定义其被积分项 $\nabla_h \cdot (\mathbf{V}_\psi k)$ 为 KDR； $-(1/s) \int_0^{p_0} \iint_s \nabla_h \cdot (\mathbf{V}_x k) dsdp$ 为辐散风动能通量散度，定义其被积分项为 KDD； $-(1/s) \int_0^{p_0} \iint_s [\partial(\omega k)/\partial p] dsdp$ 为动能垂直通量散度，定义其被积分项为 VD， $-(1/s) \int_0^{p_0} \iint_s \mathbf{V}_\psi \cdot \nabla_h \varphi dsdp$ 为正压过程动能产生率，即位势梯度通过旋转风所做的功，定义其被积分项为 BTG； $-(1/s) \int_0^{p_0} \iint_s \mathbf{V}_x \cdot \nabla_h \varphi dsdp$

为斜压过程动能产生率, 即位势梯度通过辐散风所做的功, 定义其被积分项为 BCG; $-D(k)$ 为动能耗散项, 定义其被积分项为 RES, 该项可由余项求得。

由于我们主要关注的是有效位能如何转化为动能, 因而本文有效位能收支采用了有限区域的能量方程组(丁一汇和刘月贞, 1985):

$$\frac{\partial K_{\psi}}{\partial t} = B_{\psi} + C(K_z, K_{\psi}) + F_{\psi}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial K_z}{\partial t} = B_z + C(P, K_z) - C(K_z, K_{\psi}) + F_z, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(P+I)}{\partial t} = B_{P+I} - C(P, K_z) + Q_{P+I} F_T. \quad (4)$$

上述方程组即为有限区域内能量的闭合方程。其中, 旋转风 $\mathbf{V}_{\psi}=k\times\nabla\psi$ (k 为 z 方向单位矢量), 辐散风 $\mathbf{V}_z=-\nabla\chi$, ψ 是流函数, χ 为势函数, $P+I$ 为全位能(P 为位能, I 为内能), K_z 为辐散风动能, K_{ψ} 为旋转风动能, B_{ψ} 、 B_z 、 B_{P+I} 为各种能量的边界通量项, 对闭合系统而言, B_{ψ} 、 B_z 、 B_{P+I} 均为 0, $Q_{P+I}=Q_L+Q_S+Q_R$ 为非绝热加热场, 分别对应凝结加热、感热加热和辐射加热, F 项全为摩擦消耗, 全位能与 K_z 间的转换函数(即有效位能与动能间的转化) $C(P, K_z)$ 表达式如下:

$$C(P, K_z) = -\chi \nabla_h^2 \phi = -\nabla_h \cdot (\chi \nabla_h \phi) + \nabla_h \cdot (\phi \nabla_h \chi) - \frac{\partial \phi \omega}{\partial p} - \frac{RT}{p} \omega. \quad (5)$$

由方程(2)~(4)可知, 有效位能总是先转化为辐散风动能, 再由辐散风动能转化为旋转风动能。方程(5)即为有效位能向动能的转换项, 是本文重点研究的对象。

3 本次寒潮的演变过程和环境场特征

3.1 寒潮过程综述

2004~2005 年冬季中国爆发了两次强寒潮事件, 分别发生在 2004 年 12 月 22 日~2005 年 1 月 1 日和 2005 年 2 月 14~21 日(丁一汇和马晓青, 2007), 其中第一次寒潮事件首先影响了我国大陆, 同时影响到了日本, 进而向南影响到了台湾和香港。本文选取的研究时段是 2004 年 12 月 28~31 日, 对应于丁一汇和马晓青(2007)研究的第一次寒潮事件的第三阶段的寒潮爆发过程。图 1 给出这次寒潮过程的地面对形势演变, 其中台湾大部分地区

温度都在 10 ℃以下, 淡水的气温甚至低至 4.8 ℃, 香港的最低温度低至 4 ℃(图略), 香港天文台则于 12 日 31 日同时发出寒冷、霜冻、强烈季候风等 4 个警告。由本次强寒潮引发的冷涌继续向低纬推进, 使得海口在 30 日 00:00(协调世界时, 下同)至 31 日 00:00 的 24 h 内下降了 10 ℃(图 1), 此次冷涌一直向南越过了赤道, 影响到了南半球的天气(赵思雄和曾庆存, 2005)。

2004 年 28 日 18:00, 内蒙古中西部有强冷平流发展伴随 10 m/s 以上的强北风(图略), 29 日 00:00, 陕西西部出现了强冷平流和强北风区, 0 ℃温度线显著南压, 此时我国西南部的冷平流(伴有强西风)也有所加强(图 2a); 之后陕西西部的冷平流区扩展并与我国西南部的冷平流区连成一片, 盛行 10 m/s 以上的西北风(图略); 29 日 12:00, 受热带偏南风的暖平流影响, 我国西南部的冷平流区有所减弱, 而陕西附近的冷平流区依然维持较强, 并伴有强西北风(图 2b); 29 日 18:00, 位于陕西附近的强冷平流区与我国东北部的强冷平流区连成一片, 呈“东北—西南”走向, 受强西北风(10 m/s 以上)控制, 向东南方移动(图略); 30 日 00:00, “东北—西南”走向的冷平流区范围变化不大, 向东南略有移动, 此时我国南方的偏北风显著加强(图 2c), 有较强的冷涌出现在南海北部(由图 1, 海口风向转为北风, 并显著开始降温); 30 日 06:00, “东北—西南”走向的冷平流区范围显著加大、西伸、南压, 我国南海风速转为偏北风, 冷平流很强(图略); 30 日 12:00 后, 我国中部的偏北风减弱, “东北—西南”走向的冷平流区显著减弱、缩小(图 2d), 而南海上空的偏北风继续加强, 冷涌过程对应的冷平流很强, 此时冷涌满足 Lau et al. (1983) 提出的冷涌爆发的两个条件(图 1), 冷涌爆发。30 日 18:00, 山西附近西北风再次加强, 其对应的冷平流区有所发展, 而两广以北、山西以南的大片区域由于地面风很弱, 仅维持较弱的冷平流, 南海地区的偏北风和冷平流均加强(图略)。31 日 00:00~31 日 12:00(图 2e、2f), 山西附近的冷平流区随地面风减弱而减弱, 两广以北、山西以南的区域地面风维持很弱, 伴有较弱的冷平流, 南海地区的偏北风(由图 1, 南海区域维持偏北大风, 风速超过 10 m/s) 和冷平流均维持很强, 此支冷涌一直向南越过赤道进入南半球。

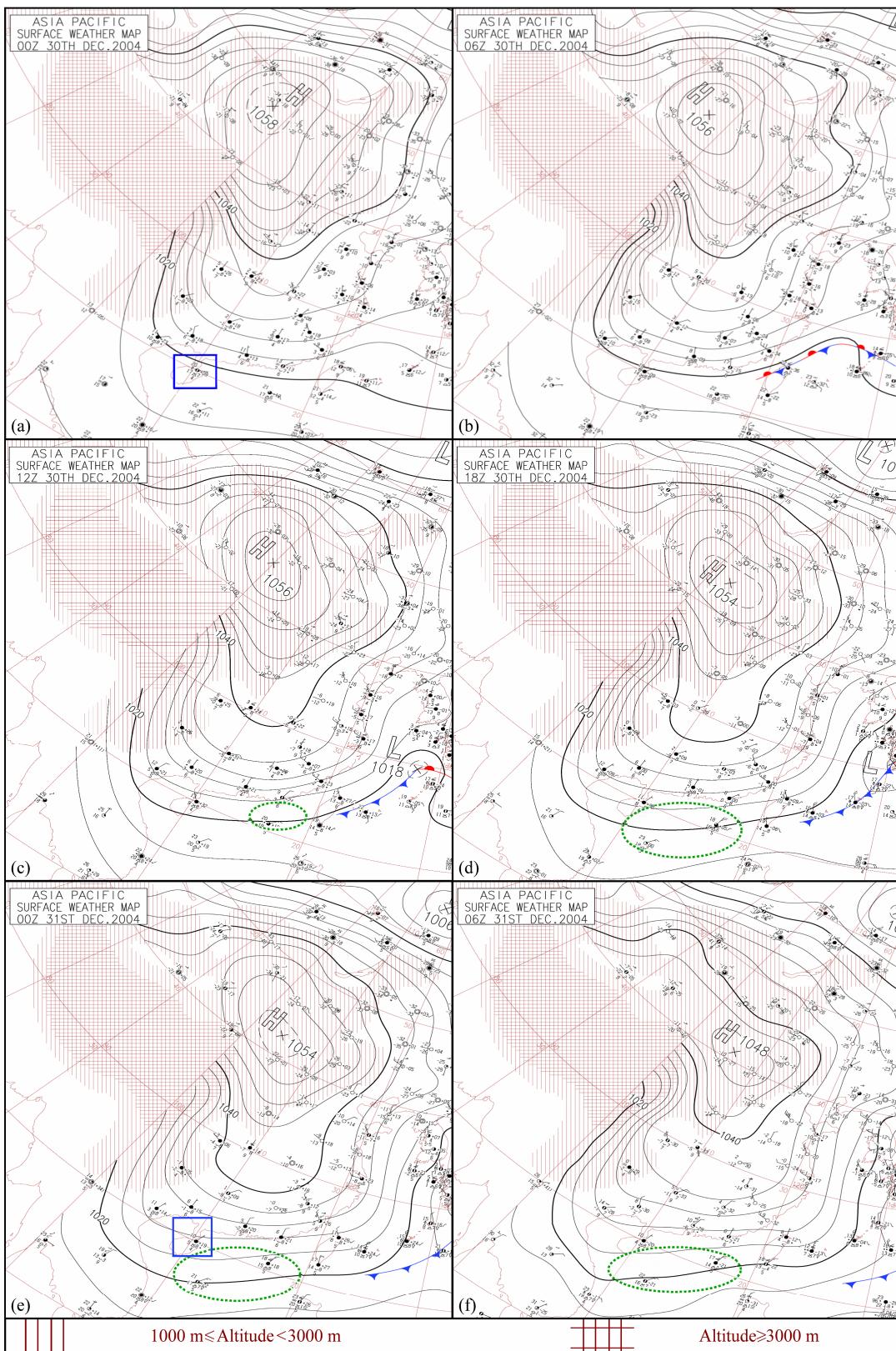


图1 日本气象厅地面天气图, 实线为海平面气压(单位: hPa), 虚线椭圆为南海区域内的大风区, 蓝色方框代表海口观测站, 长风向杆代表 10 m/s

Fig. 1 Surface maps from Japanese Meteorological Administration, solid lines indicate sea surface pressure (hPa), dashed ellipses stand for strong wind zone in the South China Sea, solid rectangles represents Haikou station and the long wind poles stand for 10 m/s

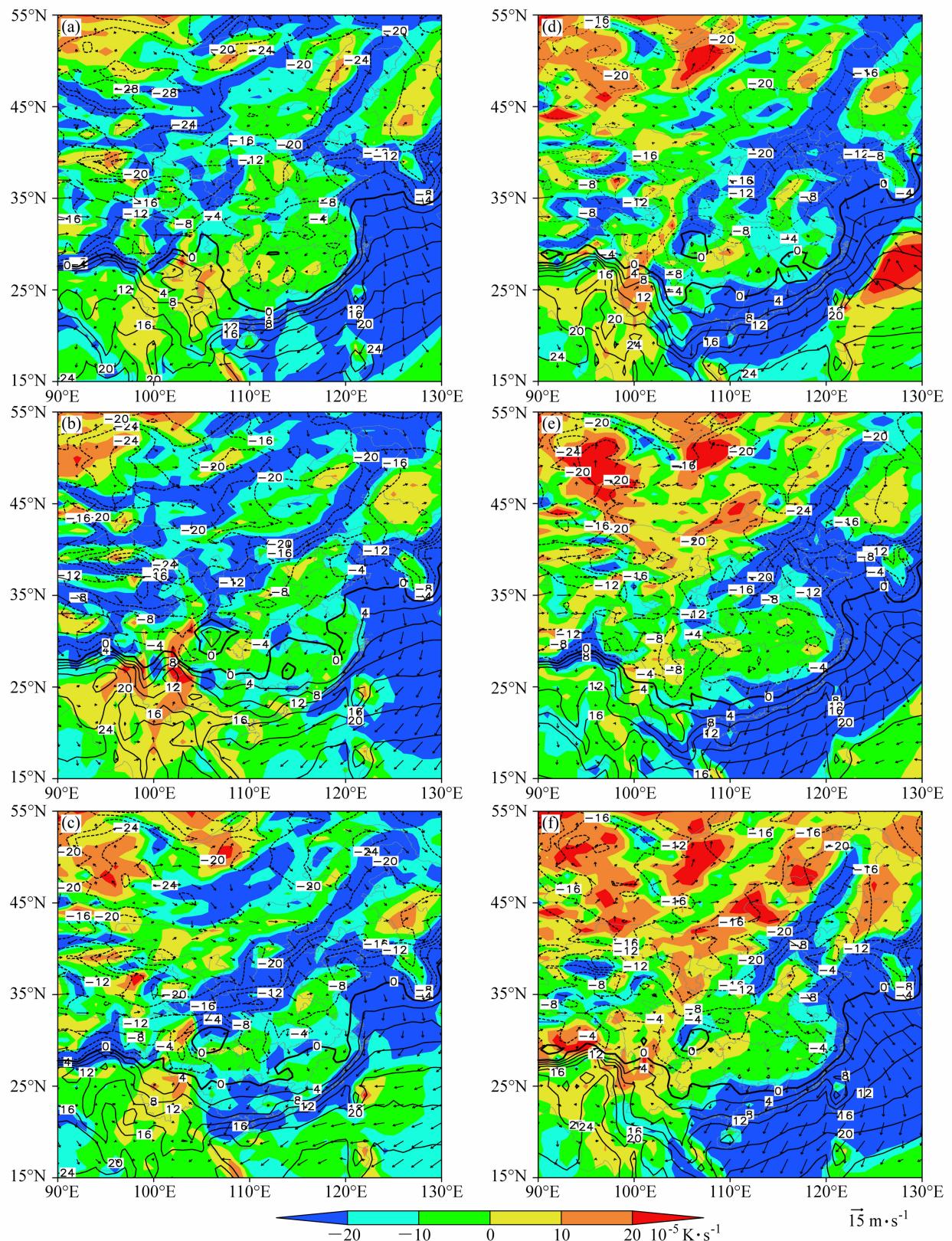


图 2 地面温度场 (等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、温度平流 (阴影) 和地面风场 (矢量箭头): (a) 2004 年 12 月 29 日 00:00; (b) 29 日 12:00; (c) 30 日 00:00; (d) 30 日 12:00; (e) 31 日 00:00; (f) 31 日 12:00

Fig. 2 Surface temperature (contour, units: $^{\circ}\text{C}$), temperature advections (shaded), and surface wind (vectors): (a) 0000 UTC 29 Dec 2004; (b) 1200 UTC 29 Dec 2004; (c) 0000 UTC 30 Dec 2004; (d) 1200 UTC 30 Dec 2004; (e) 0000 UTC 31 Dec 2004; (f) 1200 UTC 31 Dec 2004

850 hPa 上也能清楚地看到寒潮冷涌向南爆发的过程(图略),从2004年12月28日18:00开始,青藏高原东北侧有强冷平流沿高原东边缘南下,该次强冷空气的爆发伴随着偏北大风,风速超过10 m/s,冷平流区和大风区向南和向东推进的速度很快,到30日12:00,冷空气已经到达南海,此时冷涌爆发,该次强冷涌过程中冷空气继续向南越过赤道影响南半球的天气(赵思雄和曾庆存,2005)。30日12:00至31日12:00,105°E以东我国绝大部分地区均受冷平流和偏北大风控制(平均风速在10 m/s以上),四川盆地由于特殊的地形影响,冷平流不显著,中南半岛东部的冷平流维持很强;31日18:00开始,中国大陆上的冷平流和偏北大风区开始减弱,中南半岛东部的冷平流也开始减弱。

3.2 寒潮过程中的大尺度环境场特征

3.1节中介绍了此次过程中寒潮的爆发过程,本节将简单介绍一下寒潮爆发过程中的高低空环流形势。在对流层高层(图略),28日12:00,200 hPa有一个深厚大槽,槽后伴有西风急流(风速超过40 m/s),这有利于冷空气的向南爆发;29日12:00,大槽东移减慢,西风带上游有一个小槽快速移来,其槽前伴有很强的西北风(风速超过40 m/s),这十分有利于冷空气的东南而下;30日12:00,大槽东移,西风带上的小槽迅速发展,并开始与大槽合并,该两槽槽后盛行的西北大风(风速超过40 m/s)有利于冷空气的进一步南下;31日12:00,小槽与大槽合并、东移至海上,槽后的西北大风有利于寒潮的继续维持。

对流层中层(500 hPa),28日12:00,我国西北部,巴尔喀什湖以东存在一横槽,槽前的西北大风风速超过25 m/s(图3a)。29日00:00,横槽东移南压,西北大风区随之南压,十分有利于冷空气东南而下(图3b);29日12:00,横槽进一步东移南压到达内蒙古西部,此时贝加尔湖东部有一小槽发展,其槽线近似东西走向(图3c);30日00:00至12:00,横槽转竖位于115°E附近,槽后的偏北大风有利于冷空气南下,此时贝加尔湖小槽进入中国(图3d、3e)。31日00:00,115°E槽东移至120°E附近,贝湖小槽开始转竖并有所发展,其槽前的西北气流与120°E槽槽后的西北气流相叠加,有所增强,有利于冷空气持续南下,此时我国东北有一新槽发展,槽后的强偏北气流有利于高纬冷空气的南下(图3f);31日12:00,贝湖小槽转竖并入120°E

槽,槽后的西北风使得冷空气东南移动,此时我国东北部的槽有所发展,南压显著,槽后偏北风较强(图3g)。2005年1月1日00:00,120°E槽东移显著,其槽后维持强西北气流,使得海上维持很强的冷平流(图3),我国东北部的槽强度变化不大,其槽后较强的偏北风(15 m/s左右)有利于冷空气南下影响韩国和日本(图3h)。

本次寒潮过程,对流层低层850 hPa上,从巴尔喀什湖到贝加尔湖为高压脊,该脊西部的等高线较为平直盛行较强的偏西风,这十分有利于高纬冷空气的东进(图4);该脊东部(105°E以东,我国东部均受其控制)的等高线近似沿经向分布(寒潮后期转为西北东南型)盛行较强的偏北风,其最大风速超过20 m/s,十分有利于冷空气的南下,这为寒潮的爆发提供了极为有利的条件。寒潮期间,蒙古国维持一准静止的地面高压(图1),其中心初期为1060 hPa,寒潮后期中心一分为二,气压下降至1048 hPa。蒙古高压的东部盛行偏北大风(10 m/s),105°E以东,我国东部均受其控制,这十分有利于高纬冷空气的南下,为寒潮的爆发和持续提供了极为有利的条件。

4 冷涌过程的能量收支分析

由于本次寒潮、冷涌过程在850 hPa表现最明显,并且850 hPa受地形的影响相对较小,本文选取850 hPa作为研究的主要层次,研究的主要区域集中在我国的大陆和近海($20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$,此区域受寒潮的影响最大),研究的主要时段为29日12:00至31日18:00,此时段伴有明显的偏北大风区向南、向东发展。

4.1 寒潮、冷涌过程的动能收支

根据公式(1)计算了动能的收支,动能主要来自于正压过程动能制造BTG和斜压过程动能制造BCG(图略),因而本文将重点讨论这两种能量转换方式对本次寒潮爆发的影响。29日12:00,850 hPa上山西境内有风速超过10 m/s的西北风爆发,强风速区内有BTG的大值区(图5a),可见西北风的动能最初来自于基本气流动能的转化。29日18:00,西北风大值区显著加强,超过了16 m/s,此时正压转化和斜压转换均增强,但正压转换远远强于斜压转换(图5b);30日00:00,在西北风大值区的南部出现了一个新的风速超过12 m/s的北风

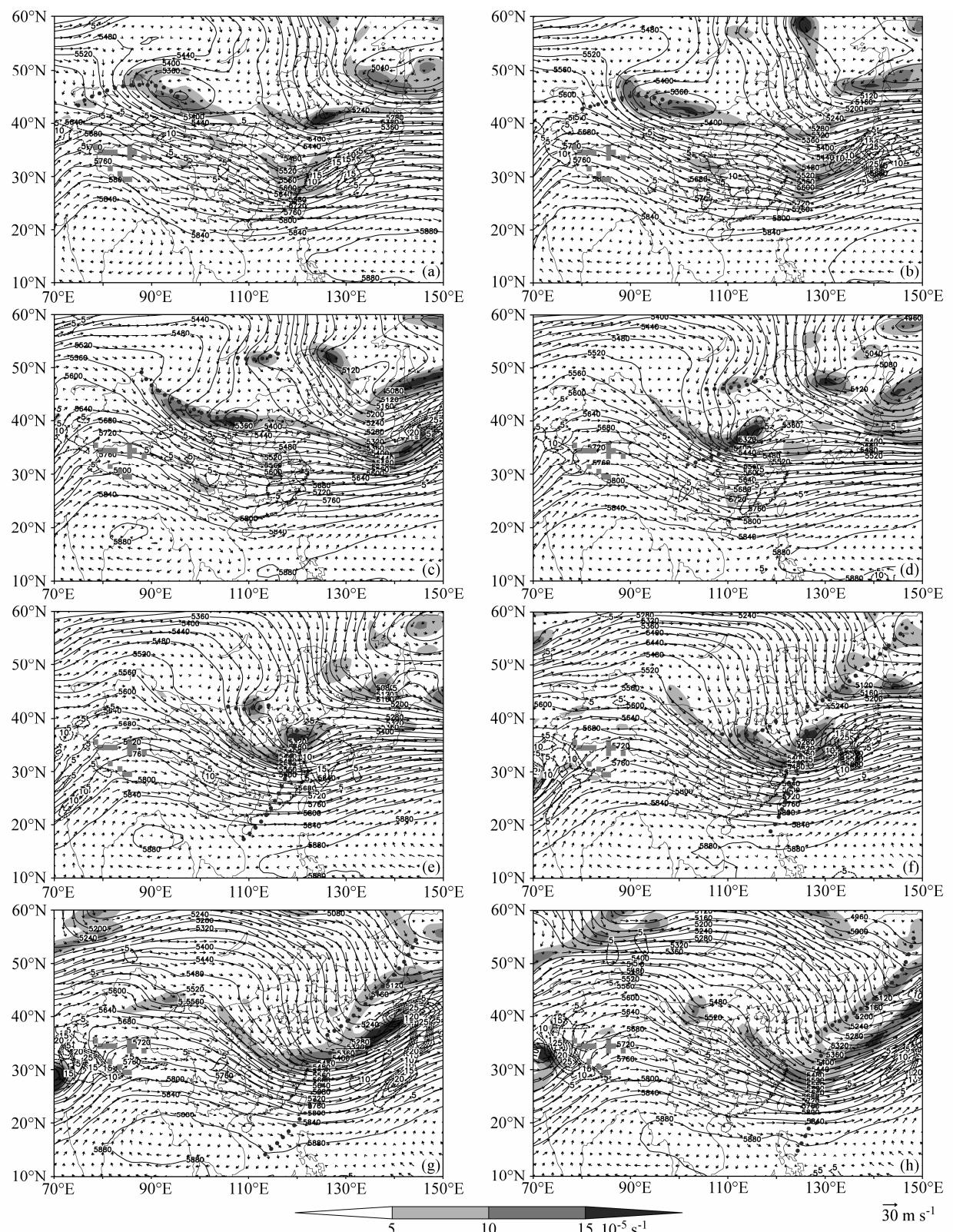


图3 500 hPa形势图, 包括500 hPa涡度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})、位势高度(实线, 单位: gpm)、水平风场(箭头)和垂直速度(虚线, 单位: 10^{-2} m/s): (a) 2004年12月28日12:00; (b) 29日00:00; (c) 29日12:00; (d) 30日00:00; (e) 30日12:00; (f) 31日00:00; (g) 31日12:00; (h) 2005年1月1日00:00。地形高度超过5000 m用小正方形填充, 粗点线为槽线

Fig. 3 Vorticity (shaded), geopotential (solid line, units: gpm), horizontal wind (vector), and vertical velocity (dashed line, units: 10^{-2} m/s) at 500 hPa, terrain above 5000 m is filled with grey square and thick dashed line indicates trough line: (a) 1200 UTC 28 Dec 2004; (b) 0000 UTC 29 Dec; (c) 1200 UTC 29 Dec; (d) 0000 UTC 30 Dec; (e) 1200 UTC 30 Dec; (f) 0000 UTC 31 Dec; (g) 1200 UTC 31 Dec; (h) 0000 UTC 1 Jan 2005

大值区，此时有效位能的释放大大加强使斜压转换显著增大，与正压转换的数值相当，在南部新生的北风大值中心里，正压转化强于斜压转换（图 5c）；30 日 06:00，最大风速区增大且向东南移（图 5d），大风区的北部以正压转换为主（这与此处强基本气流的维持有很大关系），斜压转换较弱，而大风区的南部则以斜压转换为主，主要由于冷暖空气对峙，有效位能显著增大（图略）。30 日 12:00，大风南压、东扩，南部出现了 16 m/s 之上的最大风速中心，北部的最大风速中心由于能量转化减弱而减弱，在我国的东部大风区正压、斜压转换相当（图 5e）；30 日 18:00，最大风速区再次增大，在我国的北部、南部和东部各自维持风速在 16 m/s 之上的最大风速中心，均伴有较强的正压、斜压转换过程（图 5f），大风区南部的强斜压转换带大致与 850 hPa 等

温线的密集带相对应（图略）；31 日 00:00，大陆上的正压、斜压动能制造和大风区强度均减弱，在中国北部和南部的最大风速区内正压转换均大于斜压转换的强度（图 5g），此时，最大风速区东移至海上，正压转换很强，斜压转换较弱。31 日 06:00，大陆上的正压、斜压动能制造和大风区均显著减弱（图 5h），海上的最大风速区东移，在其东北部出现强斜压转换对应了此时的爆发气旋（Luo et al., 1992; Rausch and Smith, 1996; Walther and Smith, 1998）；31 日 12:00，风速超过 12 m/s 的最大风速区近维持在我国南部，其正压转换强于斜压转换，我国北方 40°N 附近维持强斜压转换和大风区，海上的最大风速区东移（图 5i）；31 日 18:00，我国大陆上的最大风速区和正压、斜压动能制造均显著减弱，我国东部沿海的最大风速区也显著减弱（图 5j）。

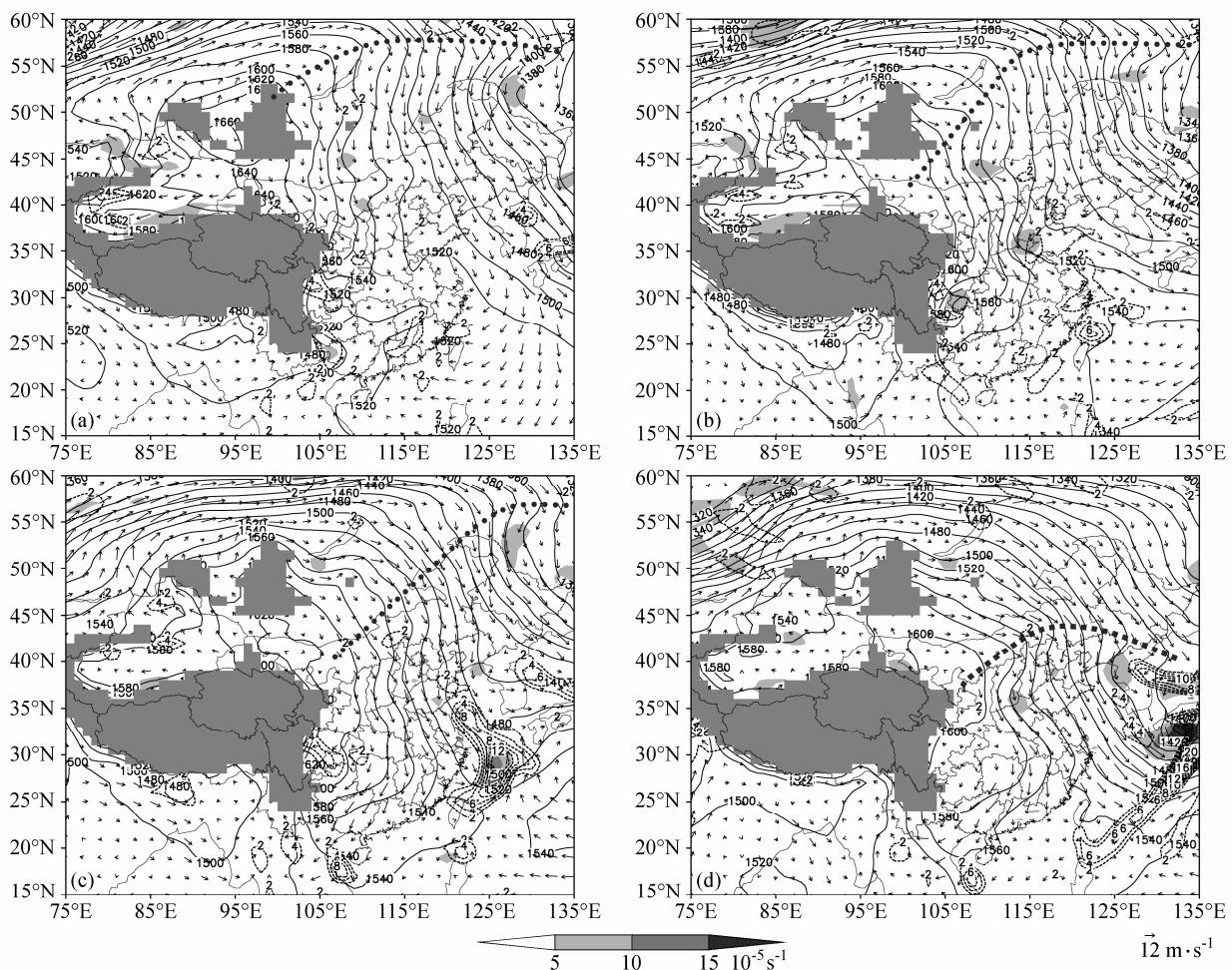


图 4 850 hPa 形势图，包括 850 hPa 涡度（阴影）、位势高度（实线，单位：gpm）、水平风场（箭头）和垂直速度（虚线，单位： 10^{-2}m/s ）：(a) 2004 年 12 月 29 日 12:00；(b) 30 日 00:00；(c) 30 日 12:00；(d) 31 日 00:00。地形高度超过 1500 m 用小正方形填充，粗点线为脊线

Fig. 4 Vorticity (shaded), geopotential(solid line, units: gpm), horizontal wind(vector), and vertical velocity (dashed line, units: 10^{-2}m/s) at 850hPa, terrain above 1500 m is filled with grey square and thick dashed line indicates ridge line: (a) 1200 UTC 29 Dec 2004; (b) 0000 UTC 30 Dec 2004; (c) 1200 UTC 30 Dec 2004; (d) 0000 UTC 31 Dec 2004

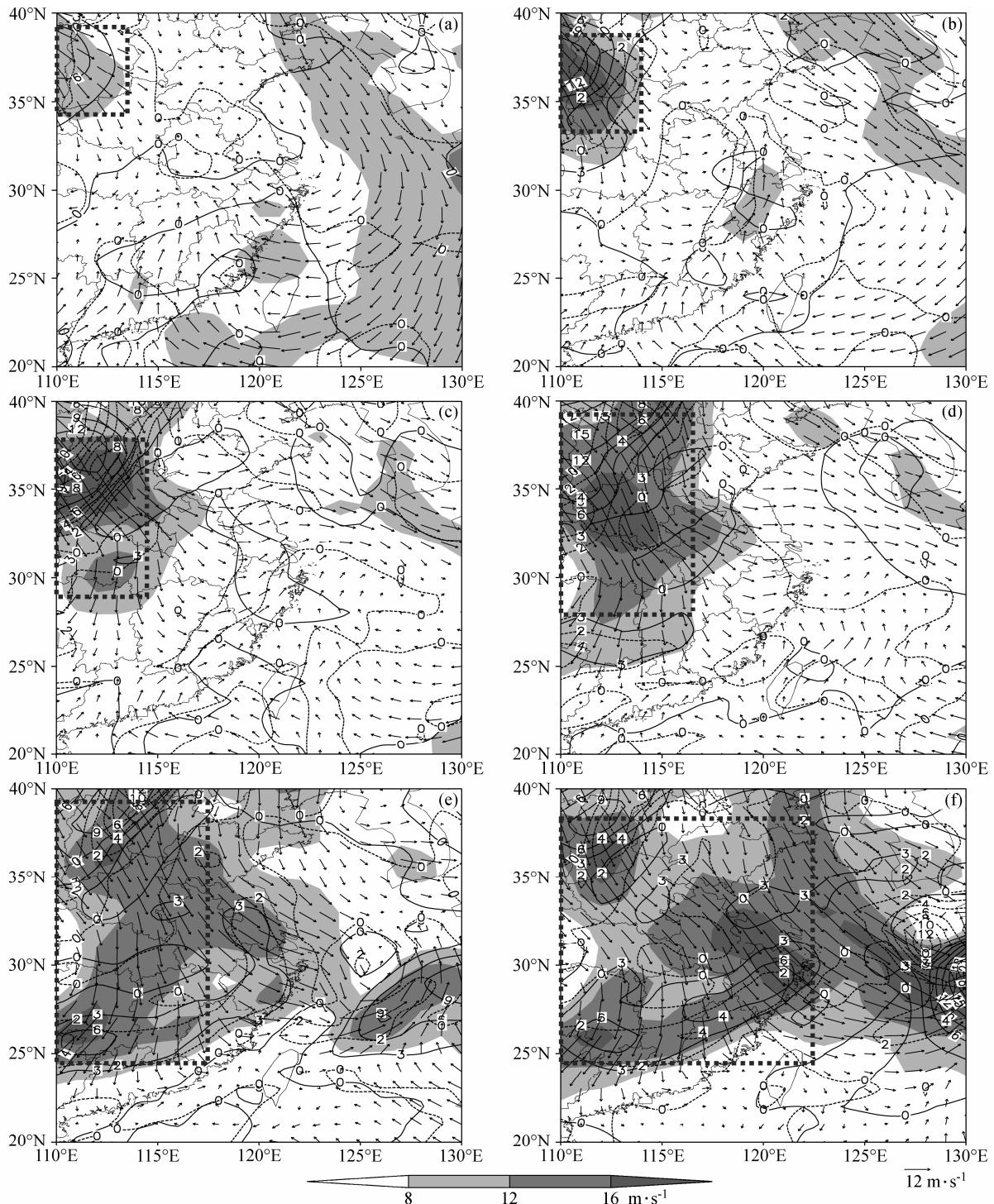


图5 动能制造图, 包括850 hPa水平速度(阴影, 粗虚线方框为大风区)、水平风场(箭头)、正压过程动能制造率BTG(实线, 单位: $10^{-3} \text{ J s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)、斜压过程动能制造率BCG(虚线, 单位: $10^{-3} \text{ J s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$): (a) 2004年12月29日12:00; (b) 29日18:00; (c) 30日00:00; (d) 30日06:00; (e) 30日12:00; (f) 30日18:00; (g) 31日00:00; (h) 31日06:00; (i) 31日12:00; (j) 31日18:00

Fig. 5 Kinetic energy genesis at 850 hPa, including horizontal velocity (shaded, the dashed rectangles represent strong wind zone), horizontal wind (vector), BTG (solid, units: $10^{-3} \text{ J s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$), and BCG (dashed, units: $10^{-3} \text{ J s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) at 850 hPa: (a) 1200 UTC 29 Dec 2004; (b) 1800 UTC 29 Dec 2004; (c) 0000 UTC 30 Dec 2004; (d) 0600 UTC 30 Dec 2004; (e) 1200 UTC 30 Dec 2004; (f) 1800 UTC 30 Dec 2004; (g) 0000 UTC 31 Dec 2004; (h) 0600 UTC 31 Dec 2004; (i) 1200 UTC 31 Dec 2004; (j) 1800 UTC 31 Dec 2004

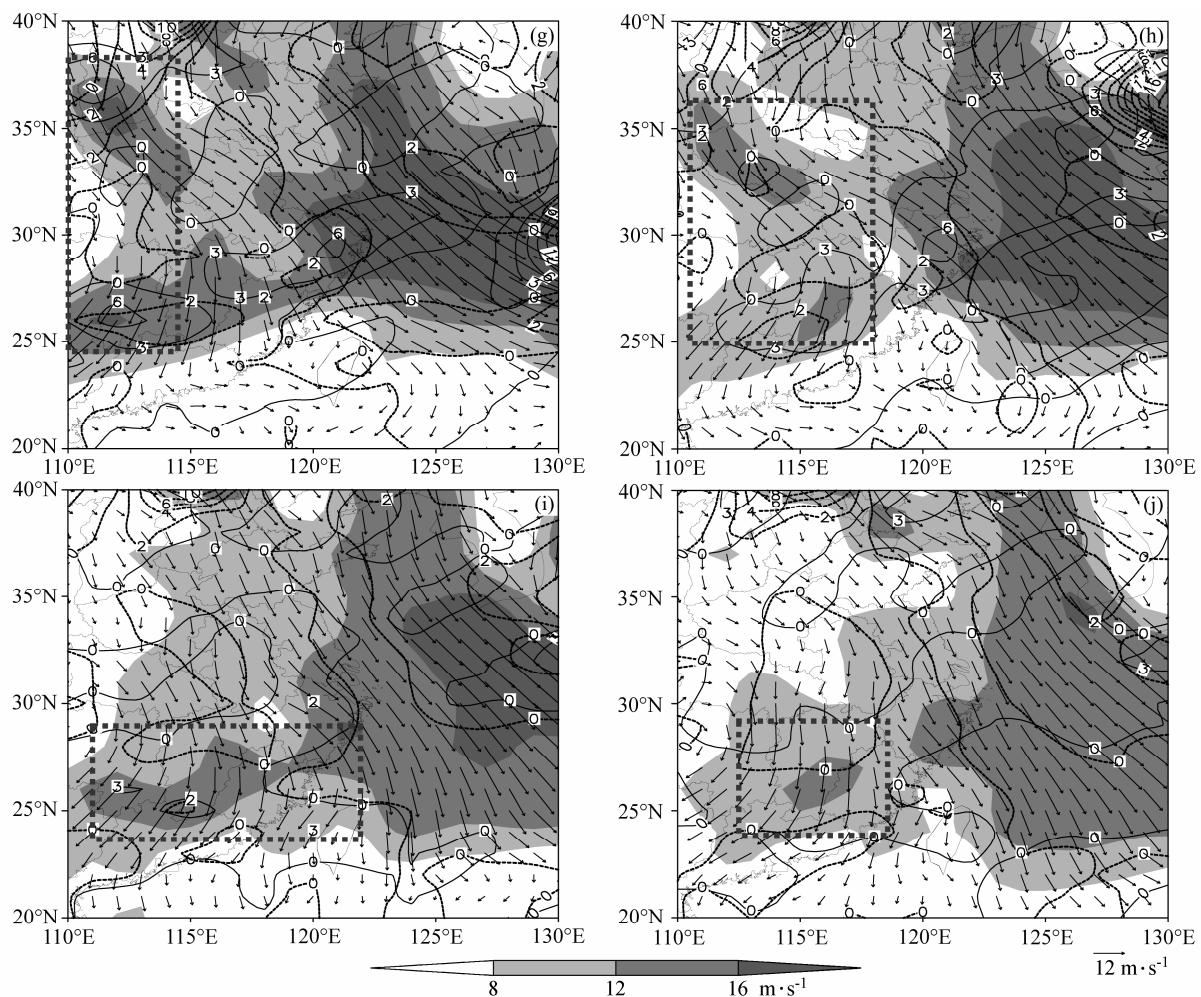


图 5 (续)

Fig. 5 (Continued)

4.2 寒潮冷涌过程的有效位能收支

以上分析可知,自30日00:00起,我国北方40°N附近一直维持强斜压转换,斜压能量的转换与此处的强下沉运动有关(图略),冷空气下沉有利于有效位能释放,这对于动能的制造十分有利。由方程(2)~(4)表明有效位能总是先转化为辐散风动能,即冷区下沉和暖区上升引发的辐合辐散运动,然后再由辐散风动能转化为旋转风动能,由此可知,对于孤立系统而言,有效位能是动能的根本来源,斜压转化为正压转化提供了必要条件。由4.1和上述分析可知,斜压转换,即有效位能向动能的转换[见公式(5)]是本次寒潮爆发的重要影响因子,因而需要对之作进一步的细致分析。由于整层有效位能的释放都可能影响到850 hPa上风速的变化,因而本节采用了从地面到100 hPa积分的整层有效位能作为研究对象。

29日12:00,我国西北的大风区内有效位能释放并不显著(图6a),这与4.1中的分析一致,29日18:00,有效位能释放显著加强(图6b),大风区也随之加强(与4.1中的分析一致);30日00:00至30日06:00,最大风速区与有效位能释放的最大区一起东南移动,有效位能为动能的制造提供了能源(图6c、6d);30日12:00,有效位能转换项有所加强,我国南部新生的最大风速区内有效位能释放显著(与4.1中的结论一致);30日18:00,有效位能释放大值区东移并新生一中心与最大风速区相对应,我国东部海上有很强的有效位能释放(图6f),这十分有利于爆发气旋的生成(此时海上有爆发气旋发生发展);31日00:00,我国大陆上的有效位能释放显著减弱,大风区亦减弱(图6g);6 h后我国大陆上的有效位能释放和大风区均显著减弱(图6h),如4.1中所述;31日12:00,我国东部、

南部的有效位能释放维持较弱, 大风区继续减弱(图6i); 6 h后我国东部有效位能释放再次增加(图6j), 对应了高层风速的加大(图略)。由图7, 大

风区内有效位能释放有3个比较典型的区域, 即对流层低层、中层和高层。有效位能在对流层低层维持正值区, 这表明, 有效位能的释放十分有利于低

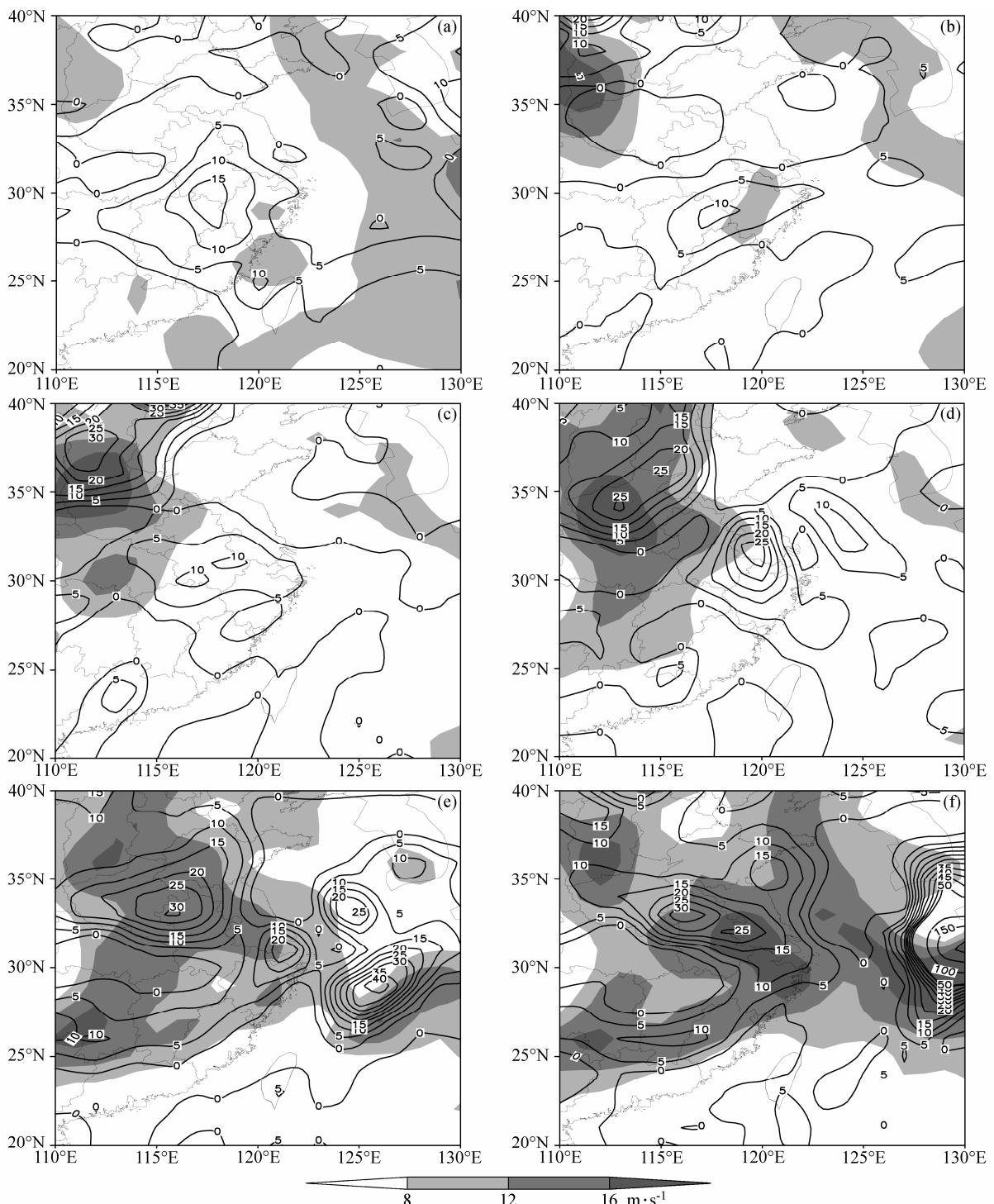


图6 有效位能转化图, 包括850 hPa风速大小(阴影)、整层(地面至100 hPa)积分的有效位能向辐散风的能量转化(实线, 单位: $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$):
(a) 2004年12月29日12:00; (b) 29日18:00; (c) 30日00:00; (d) 30日06:00; (e) 30日12:00; (f) 30日18:00; (g) 31日00:00; (h) 31日06:00;
(i) 31日12:00; (j) 31日18:00

Fig. 6 The conversion of APE, including horizontal wind (shaded) at 850 hPa, intergrated (surface to 100 hPa) APE conversion (solid, units: $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$):
(a) 1200 UTC 29 Dec 2004; (b) 1800 UTC 29 Dec 2004; (c) 0000 UTC 30 Dec 2004; (d) 0600 UTC 30 Dec 2004; (e) 1200 UTC 30 Dec 2004; (f) 1800
UTC 30 Dec 2004; (g) 0000 UTC 31 Dec 2004; (h) 0600 UTC 31 Dec 2004; (i) 1200 UTC 31 Dec 2004; (j) 1800 UTC 31 Dec 2004

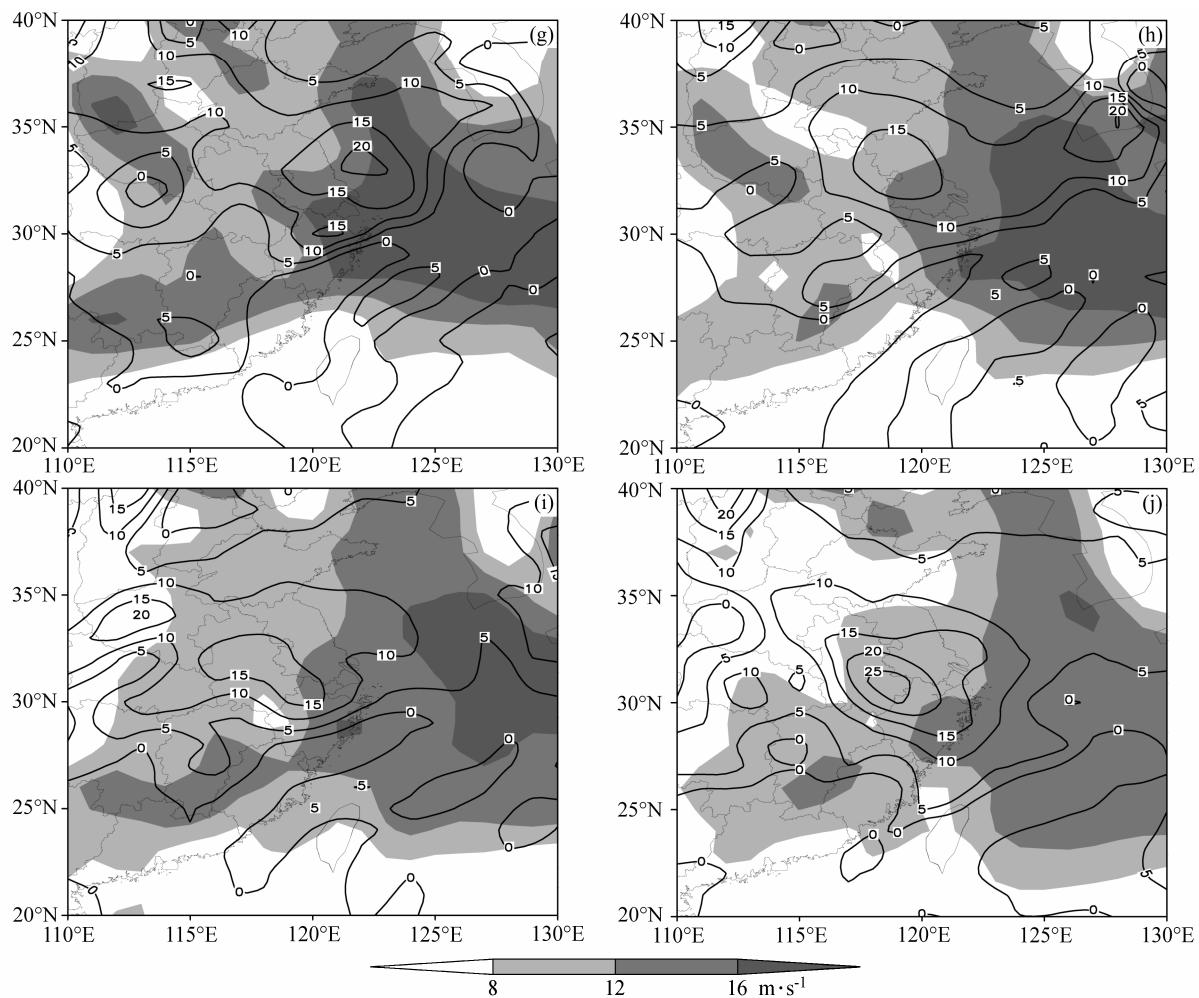


图 6 (续)
Fig. 6 (Continued)

层风速的增大，对流层中上层的情况则比较复杂，其中，对流层上层受有效位能的影响很大（当该项值为正时有效位能转换为风的动能有利于风速增大，值为负时即冷区上升，暖区下沉，这使得风能向有效位能转换，从而不利于风速增大）；而对流层中层所受的影响最小，且以风能向有效位能转换为主。

5 结论与讨论

2004~2005 年冬季中国爆发了两次强寒潮事件，分别发生在 2004 年 12 月 22 日~2005 年 1 月 1 日和 2005 年 2 月 14~21 日，其中第一次寒潮事件在我国南海引发了强烈的冷涌，该支冷涌一直向南越过赤道影响南半球（赵思雄和曾庆存，2005）。

本文利用 NCEP 资料和常规地面观测资料研究了 2004 年 12 月 28~31 日的强寒潮、冷涌事件及其能量转化过程，主要结论如下：

(1) 本次过程中大尺度环境场有利于寒潮冷涌的爆发，本次寒潮属于“横槽转竖型”，伴随 200 hPa 的西风带大槽的调整，500 hPa 经历了一次明显的横槽转竖过程。此外，贝加尔湖小横槽的南压、转竖以及与我国东部大槽的合并都有利于冷空气的南下；对流层低层的蒙古高压东侧的偏北大风是冷空气向南爆发的有利条件。

(2) 动能收支的结果表明，正压动能制造和斜压动能制造对本次寒潮大风区内的动能制造均有贡献。其中寒潮爆发初期，以正压制造过程为主，这表明纬向平均气流的动能对寒潮爆发十分重要，此后斜压制造过程大大加强（强度与正压转化相当），

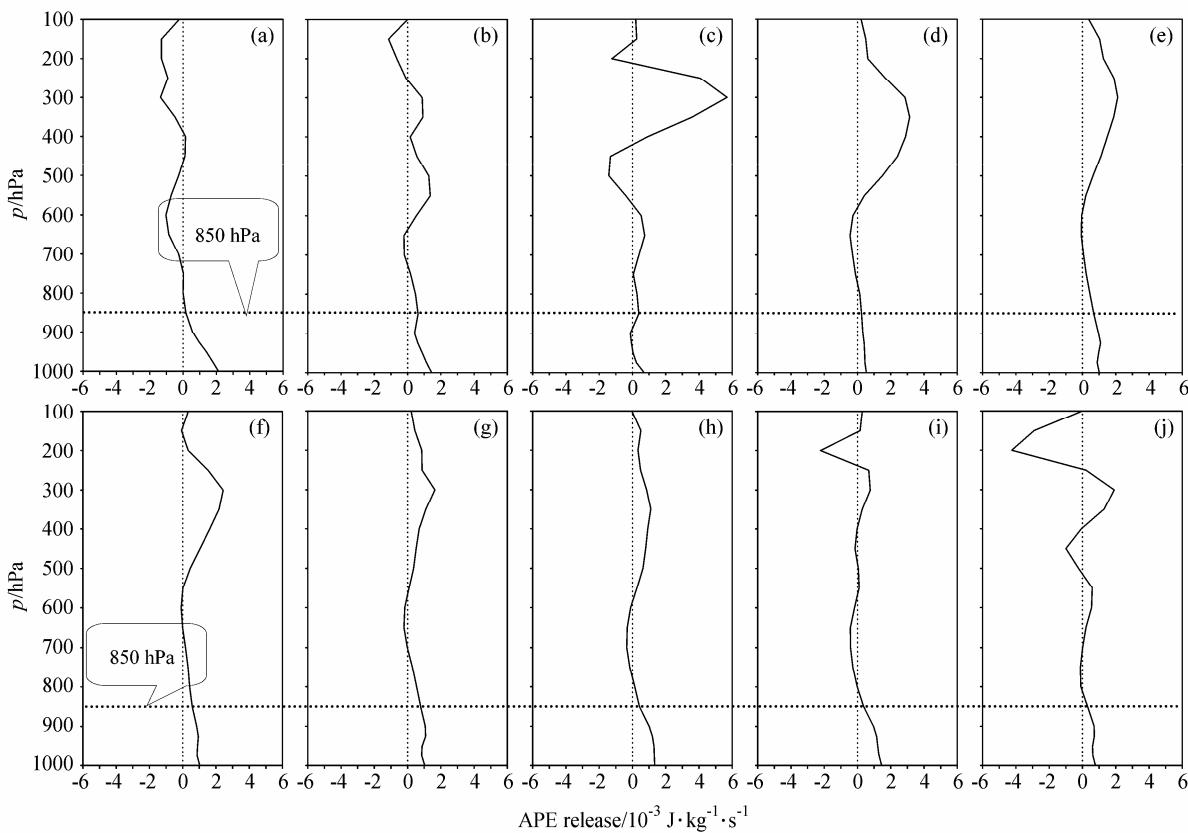


图7 大风区区域(图5中同时刻的虚线矩形框区域)平均的有效位能转化项垂直分布: (a) 2004年12月29日12:00; (b) 29日18:00; (c) 30日00:00; (d) 30日06:00; (e) 30日12:00; (f) 30日18:00; (g) 31日00:00; (h) 31日06:00; (i) 31日12:00; (j) 31日18:00

Fig. 7 Area-averaged cross section of APE release in the strong wind zone(as the dashed rectangles shown in Fig.5): (a) 1200 UTC 29 Dec 2004; (b) 1800 UTC 29 Dec 2004; (c) 0000 UTC 30 Dec 2004; (d) 0600 UTC 30 Dec 2004; (e) 1200 UTC 30 Dec 2004; (f) 1800 UTC 30 Dec 2004; (g) 0000 UTC 31 Dec 2004; (h) 0600 UTC 31 Dec 2004; (i) 1200 UTC 31 Dec 2004; (j) 1800 UTC 31 Dec 2004

尤其是在大风区的北侧(冷区伴有强下沉运动)和南侧(温度对比显著, 因而有效位能较强)。大风区随着动能制造的增强而增强。寒潮爆发后期, 斜压、正压动能制造均减弱, 大风区亦随之减弱。这次过程中30日18:00在海上有爆发气旋发展, 这对应了很强的正压、斜压能量转换过程。

(3) 有效位能的收支表明, 整层有效位能的释放与大风区位置相对应, 有效位能的释放有利于寒潮、冷涌大风区的维持。寒潮大风区内对流层高层受有效位能释放的影响最大, 有效位能和风能可以互相转换; 对流层中层受到的影响最小, 且以风能向有效位能转换为主; 对流层低层则以有效位能向动能转化为主, 这十分有利于低层风速的增大和维持。

需要指出的是, 尽管本次寒潮过程特征十分明显, 但是由于东亚地区寒潮活动的情况十分多样并且复杂, 因而要深入揭示我国冬季风期间寒潮活动的能量特征还需要对更多的寒潮过程作更深入的

研究。

参考文献 (References)

- Chen T C, Alpert J C, Schlatter T W. 1978. The effects of divergent and nondivergent winds on the kinetic energy budget of a mid-latitude cyclone: a case study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 106 (4): 458–468.
- Chen T C, Yen M C, Huang W R, et al. 2002. An East Asian cold surge: case study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (9): 2271–2290.
- Chen T C, Huang W R, Yoon J H. 2004. Interannual variation of the East Asian cold surge activity [J]. *J. Climate*, 17 (2): 401–412.
- Davis C A. 1995. Observations and modeling of a mesoscale cold surge during WISPIT [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (6): 1762–1780.
- 丁一汇, 刘月贞. 1985. 台风中动能收支的研究——II 辐散风动能和无辐散风动能的转换 [J]. 中国科学(B辑), 11 (1): 1045–1054. Ding Yihui, Liu Yuezhen. 1985. On the analysis of typhoon kinetic energy-Conversion between divergent and nondivergent wind [J]. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 11 (1): 1045–1054.
- 丁一汇, 马晓青. 2007. 2004/2005年冬季强寒潮事件的等熵位涡分析 [J]. 气象学报, 65 (5): 695–707. Ding Yihui, Ma Xiaoqing. 2007. Analysis of isentropic potential vorticity for a strong cold wave in

- 2004/2005 Winter [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (5): 695–707.
- Lau K M, Chang C P, Chan P H. 1983. Short-term planetary-scale interactions over the tropics and midlatitudes. Part II: Winter-Monex period [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111 (7): 1372–1388.
- Luo A R, Smith P J, Zwack P. 1992. A diagnosis of the explosive development of two extratropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120 (8): 1490–1523.
- 钱维宏, 张玮玮. 2007. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1266–1278. Qian Weihsong, Zhang Weiwei. 2007. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (6): 1266–1278.
- Rausch R L M, Smith P J. 1996. A diagnosis of a model-simulated explosively developing extratropical cyclone [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (5): 875–904.
- Walthorn K D, Smith P J. 1998. The dynamics of an explosively developing cyclone simulated by a general circulation model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126 (11): 2764–2781.
- 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1068–1076. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (6): 1068–1076.
- 杨松, 朱乾根. 1989. 冷涌结构及冷涌期中低纬环流相互作用的数值试验 [J]. *热带气象学报*, 5 (3): 227–234. Yang Song, Zhu Qiangen. 1989. The numerical study of cold surge structure and interaction between midlatitudes and tropics during cold surge [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 5 (3): 227–234.
- 张敏锋, 刘晓东, 焦彦军. 1998. 利用有限区域模式对 1979 年 1 月东亚平均环流和寒潮过程的初步模拟试验 [J]. *大气科学*, 22 (3): 294–304.
- Zhang Minfeng, Liu Xiaodong, Jiao Yanjun. 1993. Preliminary simulation experiments of East Asian mean circulation and cold surge processes of January 1979 using limited area models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 22 (3): 294–304.
- 张韧, 张为付. 1994. 冬季风期间南海地区冷涌的动力学分析 [J]. *热带气象学报*, 10 (2): 122–129. Zhang Ren, Zhang Weifu. 1994. Dynamical analysis of cold surge in the south China Sea during Winter monsoon [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 10 (2): 122–129.
- 张元箴, 吴洪, 张兴旺. 1993. 北半球冬季冷涌及其反馈过程对我国南方降水的影响 [J]. *应用气象学报*, 4 (4): 482–486. Zhang Yuanzhen, Wu Hong, Zhang Xingwang. 1993. Influence of cold surges and its feedback in northern Winter on Precipitation in the south of China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 4 (4): 482–486.
- 赵思雄, 曾庆存. 2005. 东亚强寒潮——冷涌越过赤道并引发南半球热带气旋和强降水的个例研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 507–525. Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2005. A study of East Asia strong cold wave—surge crossing Equator and influencing the development of tropical cyclone and heavy rainfall in the Southern Hemisphere [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 507–525.
- 周学群. 1989. 两次冷涌过程的分析 [J]. *热带气象学报*, 5 (1): 57–62. Zhou Xuequn. 1989. An analysis of two cold surges [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 5 (1): 57–62.