

突发天气机理和应用研究初步

汪厚基

(内蒙古自治区气象局, 呼和浩特 010051)

摘 要 为研究大气运动突然失衡的原因和机理, 从气压入手, 通过分析大气运动的宏观力学行为和关系, 找到了置运动于突然失衡的大气内部之力——爆发力, 给出了爆发方程, 并提出一些新观念。通过对爆发方程的初步分析应用, 发现一些突发性的灾害天气是有可能预报的。

关键词: 突发天气机理; 观察层次; 动力学诊断

文章编号 1006-9895 (2004) 02-0285-09 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

1 问题的提出

大范围的大气运动, 总是处在准地转平衡、失衡到新的准平衡, 这样往复循环的变动之中。大气的启动靠力, 平衡的维持靠力, 平衡的破坏要不要力? 大气内部有无此力, 是什么? 这是一个既老又新的问题。20 世纪 30 年代, 地转偏差已使人感到棘手, 被视为“难以克服的困难”。20 世纪 60 年代, 有人开始研究并指出研究不平衡问题是重要的^[1]。但到了 20 世纪 90 年代, “在什么条件下和通过什么机制使气旋中的非地转风突然加大”这样一个问题, 仍是“今后值得研究的”^[2]。现在又过了 10 年。这个问题仍未能回答清楚。

失衡的原因, 大气运动方程本身无能为“理”。但可启示: 在不计摩擦的情况下, 大气若要失衡, 主动权只在气压。因为在地转平衡条件下, 加速为零, 运动无从改变; 气压的变动另有来源, 而气压场一旦出现任何变动, 都会立即引起变化, 从而打破平衡。因此, 解决失衡问题从气压入手是必要的。

然而从气压入手却面临多方面的巨大困难。其中之一就是气压倾向方程中的微差地位。不过这不是个别方程的个别现象。在现有着眼描写微团力学行为的方程中, 可以说带有一定的普遍性。长期以来人们处理这个问题很少从总体、从对事物的观察层次上考虑问题。

从现代物理学的发展历程可以看到, 事物的决定性是作为微观层次表达的合理近似, 存在于通常所说的宏观层次之中。因此, 下面对爆发问题的处理, 首先就是从着眼微团行为的微观层次跳出来, 摆脱“不识庐山真面目, 只缘身在此山中”的自困境地, 从着眼大气运动的宏观力学行为和关系这一观察层次上寻找失衡原因, 探讨天气爆发的机理。

2 爆发方程及其物理意义

首先,把气压倾向方程写在海平面上,并对整个大气层积分,

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = - \int_0^\infty \rho g \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz - \int_0^\infty g \left(u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz + \rho_0 g \omega_0, \quad (1)$$

$\omega_0 = 0$, 消除最后一项, 其余两项合并,

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty u(\rho g dz) - \frac{\partial}{\partial y} \int_0^\infty v(\rho g dz), \quad (2)$$

还以静力平衡, 换元,

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{p_0}^0 u dp + \frac{\partial}{\partial y} \int_{p_0}^0 v dp = - \nabla \cdot \int_{p_0}^0 \mathbf{V} dp, \quad (3)$$

这里 $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ 以平均层风 (一般可用 500 hPa 上的风来代表) $\bar{\mathbf{V}} = \bar{u}\mathbf{i} + \bar{v}\mathbf{j}$ 代替各层风, 对 (3) 式用积分中值定理,

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} p_0) - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v} p_0),$$

记 $p = p_0$ 为海平面气压, 写成向量形式

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \nabla \cdot (p\mathbf{V}), \quad (4)$$

上述步骤因在垂直方向做了积分, 称为宏观处理。不难看出, (4) 式就是宏观层次意义上的连续方程。

(4) 式中 $p\mathbf{V}$ 可代表大气柱的总动量。有了这一可测的气柱总动量, 气柱因动量变化而产生的力, 也就不难找到。为此, 对 (1) 式再取时间偏导,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = - \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (p\mathbf{V}) = - \nabla \cdot \left(p \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \right) - \nabla \cdot \left(\mathbf{V} \frac{\partial p}{\partial t} \right) = - \nabla \cdot \mathbf{F}_v - \nabla \cdot \mathbf{F}_p, \quad (5)$$

式中括号内的物理量是力。因运动改变而生之力, 称为变风力 (\mathbf{F}_v); 因质量改变而生之力称为变压力 (\mathbf{F}_p)。现定义爆发就是海面气压的局地加速变化, 相应的二力统称为爆发力。这里所谓的爆发与“爆发性气旋”的定义不完全相同。(5) 式就称为爆发方程。爆发力的辐合、辐散就是决定爆发现象的惟一因素。辐合则局地气压加速上升, 反之反是。因此, 由 (5) 式可知, 哪里出现了气压的加速加(减)压, 就证明那里准是发生了爆发力的辐合(散)过程。

然而, 牛顿定律中的加速是个别加速, 由 (5) 式可知,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = - \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (p\bar{\mathbf{V}}) = - \nabla \cdot \left[\frac{d}{dt} p\bar{\mathbf{V}} + \bar{\mathbf{V}} \nabla \cdot (p\bar{\mathbf{V}}) \right]. \quad (6)$$

考虑到 (4) 式和 (5) 式后, 由 (6) 式可得

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \frac{d}{dt} (p\bar{\mathbf{V}}) &= \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (p\bar{\mathbf{V}}) - \nabla \cdot [\bar{\mathbf{V}} \nabla \cdot (p\bar{\mathbf{V}})] \\ &= \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (p\bar{\mathbf{V}}) - \nabla \cdot \left(\bar{\mathbf{V}} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \\ &= \nabla \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial t} \bar{\mathbf{V}} + p \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} \right) - \nabla \cdot \left(\bar{\mathbf{V}} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \end{aligned}$$

$$= \nabla \left(p \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} \right) = \nabla \mathbf{F}_v. \quad (7)$$

由(7)式可见, 变风力就是气柱动量个别变化产生的冲力, 亦即不计局地质量变化的爆发力。(7)式从物理上进一步明确了爆发力的性质, 以及冲撞与碰撞在物理上的相似与区别。因此, 爆发方程(5)又可称为冲撞方程。

作为爆发的宏观讯号, 人们早已注意到冲撞的决定作用。像“连日重阴……一日骤晴……雨候已见, 期在明日”^[3], 像“在冷暖气团相向而行的地方有迅速发展”^[4], 在局地中小尺度强对流爆发中, 也常能看到富有加速加压特征的“高压鼻”, 这些都是明显的例证。爆发方程就是对这些宏观现象的物理概括。

3 大气对爆发的响应调整

在爆发力强制作用下, 局地海面气压加速变化还不是最终天气爆发的全过程, 而只是把运动由平衡推入不平衡。作为连续介质的大气, 一旦进入这种不平衡, 同时也进入因运动加速而急剧调整的状态。这种调整是大气自身对爆发力强制作用的一种本能响应, 故可称为响应性调整。通过这种响应性调整, 大气运动重建或达到新的平衡。

响应调整是从垂直和水平两个方面展开的。

3.1 垂直方面——爆发与垂直运动的关系

爆发与垂直运动的关系直接关系到天气现象的爆发。在 $\omega_0 = 0$ 的情况下, 不防碍定义

$$\omega_0 \equiv \frac{dp}{dt} \neq 0, \\ \frac{dp}{dt} \equiv \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p.$$

地面气压场上的平流项可以忽略

$$\omega_0 \equiv \frac{dp}{dt} \approx \frac{\partial p}{\partial t},$$

将上式代入(2)式

$$\frac{\partial \omega_0}{\partial t} \approx \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \dots \dots. \quad (8)$$

可见爆发与垂直运动 ω_0 的加速——对应。 ω_0 虽然是海面层的情况, 但由于我们把大气层视若薄层, 因此它的情况在一定程度上也代表了大气柱的总体情况, 但又并不等同差异甚大的分层垂直运动。(4)式说明, 前面以局地气压加速变化定义爆发是有物理依据的, 是符合天气爆发垂直运动突然加强的实际情况的, 是可取的。

地面是大气柱的硬边界, 借助于连续方程不难看出, 爆发除了直接引起海面气压加速外, 近地层风的散度场同时也必然作出响应调整。具体地说, 与爆发力辐散(合)、加速减(加)压直接对应的, 恰恰是大气近地层风场的急剧增强的辐合(散), 以及由此而来的系列后果, 即低层质量的迅速增加(减少)→静力平衡的破坏→中层垂直上升(下降)急剧增强, 从而爆发天气。如果爆发力在于引发爆发, 破坏平衡,

那么整个天气爆发全过程,实际上就是爆发力的引发为主导,爆发与响应同在,破坏与恢复共存,既非单一减压,亦非单一加压,而是两种作用、两种过程共存同在的复合过程。就像物体碰撞产生的系列后果一样,大气的运动、能量(质量)、结构、天气等等都处在急剧的响应调整变化之中,而爆发、响应所有变化围绕的核心就是力——爆发力的作用。这是大气运动的特殊阶段,是一种激发状态。在激发状态中,两种过程同在、两种作用并存,其生动实例莫过于台风眼。限于篇幅,这里不作展开。

3.2 水平方面——爆发与水平涡旋运动的关系

水平涡旋运动是大家熟悉而又同天气密切联系的运动。下面的讨论希望在爆发力与水平涡旋运动及其变化之间架起一座桥梁,找到两者的力学因果关系。

为表达爆发力对大气柱可能施加的陀螺式旋转的作用,对爆发力做如下运算

$$\begin{aligned}
 \mathbf{k} \cdot \nabla \times \frac{\partial}{\partial t} (p\bar{\mathbf{V}}) &= \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{k} \cdot \nabla \times (p\bar{\mathbf{V}})] \\
 &= \frac{\partial}{\partial t} \left[p \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \bar{u} \frac{\partial p}{\partial y} + \bar{v} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \\
 &= \frac{\partial}{\partial t} \left(p\zeta - \bar{u} \frac{\partial p}{\partial y} + \bar{v} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\
 &= p \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \zeta \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\bar{u} \frac{\partial p}{\partial y} - \bar{v} \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

$\mathbf{k} \cdot \nabla \times \mathbf{V} = \zeta$ 是 500 hPa 涡度, $\partial p / \partial t$ 是地面气压倾向。上式表明,如果对气柱施以陀螺之力,气柱的局地涡度和质量同时都要作出响应调整。具体地说,对本来已是气旋式转动的气柱,施以气旋式陀螺之力,除了气柱的局涡进一步增强外,地面层同时还必然出现响应性加压。其结果还是破坏静力平衡,引起中层突发加速上升,激发强对流。最后一项主要涉及较大尺度的环境条件。在环境有利或较少变动的情况下,爆发力的陀螺旋转作用,集中体现为对中小尺度强对流的引发和维持。

下一节我们用具体爆发实例证明,只要分析爆发力场,运用前面给出的方程去全力寻找爆发信息,就会发现诸如垂直运动的加速、天气的爆发、相应的气流失衡,以及半个世纪前在爆发实例分析^[5]中就已经观察到但却一直无人把它作为一个涉及基本理论的重要现象,即天气爆发前涡度平流突然加强的现象等,它们可能的信息已都尽含在爆发力场之中了。这毫不奇怪,因为上述这些现象,它们毕竟都是来自于爆发,都是大气对爆发力引发的不平衡所采取的不同形式的响应调整。

至于超越“局地”范围的响应,这就不能不涉及冲撞爆发能量的上下游间的快速传递。但这个问题早已有讨论。这里唯一需要说明的就是大气柱冲撞爆发的能量,同样也在快速传播之列(证明略)。

4 分析爆发力场(短期)预报初步试验

变压力 ($F_p = \mathbf{V} \partial p / \partial t$)、变风力 ($F_v = P \partial \mathbf{V} / \partial t$) 场,可采用差分计算,差分时间间隔这里取为 24 小时,是由前一日要素场同当日变量场搭配而成,目的是消除日变化的可能影响。只要拥有业务常规数据,这种力场随手可得。下面将通过几个爆发实例的具体业务预报或事后的动力学诊断,说明爆发力场在短期爆发天气预报中的

应用和意义。

1987年10月下旬，西伯利亚有大横槽向东南推进，29日08时（北京时，下同），西来地面冷高前缘的冷锋槽已到黄河套区，但此时下游的东海海上高压相对稳定，当上游冷高继续推进时，30日08时，上、下游高压之间发生明显冲撞：高压迅速靠拢，其间的低槽明显填塞（图略）；31日08时，在高压冲撞区（沿500 hPa气流）上游一侧的晋陕高原，早已尽在前一日夜间爆发的大雪、暴雪的覆盖之中（图1）。图2、3分别是30日08时的变压力和变风力场。根据实测数据可以逐点计算爆发力场，但这里没这样做，因为从气流与变压线或变风流同气压线所形成的网络和网络交错的程度，已不难识辨爆发力辐散强弱的地区分布了。而最强的二力辐散重叠的所在地，就是未来24小时垂直上升加速发展最为强盛的天气爆发的中心所在地。

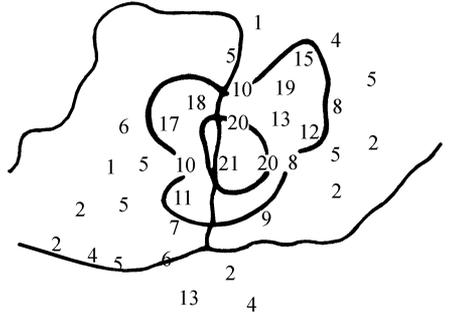


图1 1987年10月31日08时24小时降水量（单位：mm）

先看变压力场（图2），在29日08时从陕晋高原横穿而过的500 hPa气流的下游，30日08时出现横跨气流向南突出的24小时正变压（ $+\Delta p_{24}$ ）中心。上游青海一带是负变压中心。上、下游的变压形成强烈对比：变压线近于南北走向，与气流近于直交，晋陕高原上气流与等变压线网络密集交错，构成变压力场的明显辐散， 110°E 附近的 $\nabla \cdot \mathbf{F}_p \approx 0.5 \times 10^{-8} \text{ hPa s}^{-2}$ 。气流是29日的，但30日08时之前的24小时并不见天气爆发，或并不见这支气流失衡。而只待30日08时在下游突然楔入在当地具有明显加速加压特征的 $+\Delta p_{24}$ 中心之后，气流便终于迅速失衡。可见在海上高压后部西北侧，

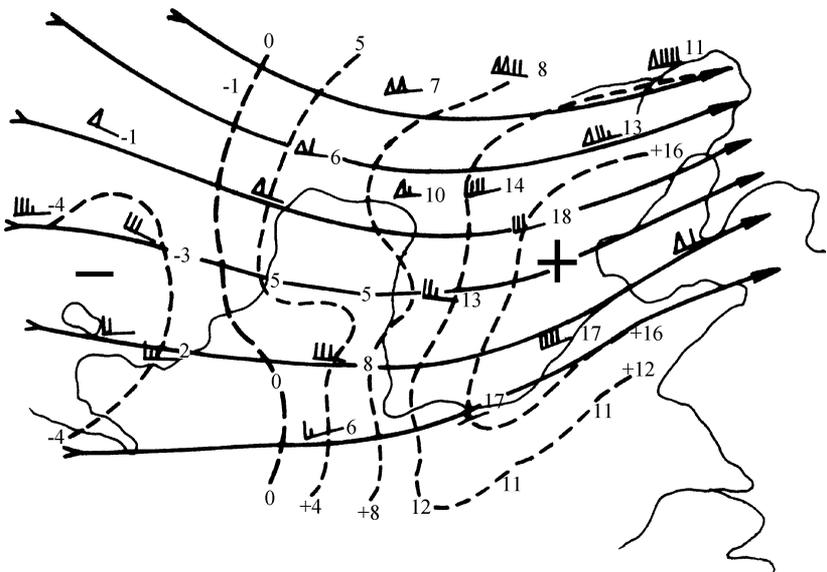


图2 1987年10月30日08时 F_p 场
实线：流线；虚线：24小时等变压线

30日08时 $+\Delta p_{24}$ 区的出现,对改变这支气流的平衡状态具有怎样的决定作用。而楔入高压后部500 hPa气流的这个 $+\Delta p_{24}$ 中心的出现,又正是上下游、冷暖侧高压冲撞的结果。可见,大气运动的特定宏观行为或过程,对识辨气流的平衡与否,也并不是全然无能为力的。

再看变风力场(图3),在鲁西、晋南一带,由于处于 $+\Delta p_{24}$ 中心的南突部位,出现了带有明显反气旋性弯曲的变风场。值得注意的是,这一反气旋式变风场,与兰州的气旋式变风场,东西相对,鲜明对比。其间的一支北上的变风流在陕北、晋西出现分支现象。其中转向西北方的一支,又是从前一日气压场的低值区吹向高值区。这就使得变风因分支而出现的变风力辐散强上加强, ($\nabla \cdot \mathbf{F}_v \approx 23.9 \times 10^{-8} \text{ hPa s}^{-2}$)。这相当于24小时后可产生约 $23 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-2}$ 的上升速度。这个变风场辐散区又恰与变压力场的最强辐散区在这里相重合。图中斜线区就是当时未来24小时将有中大雪或以上强天气爆发的预报范围。

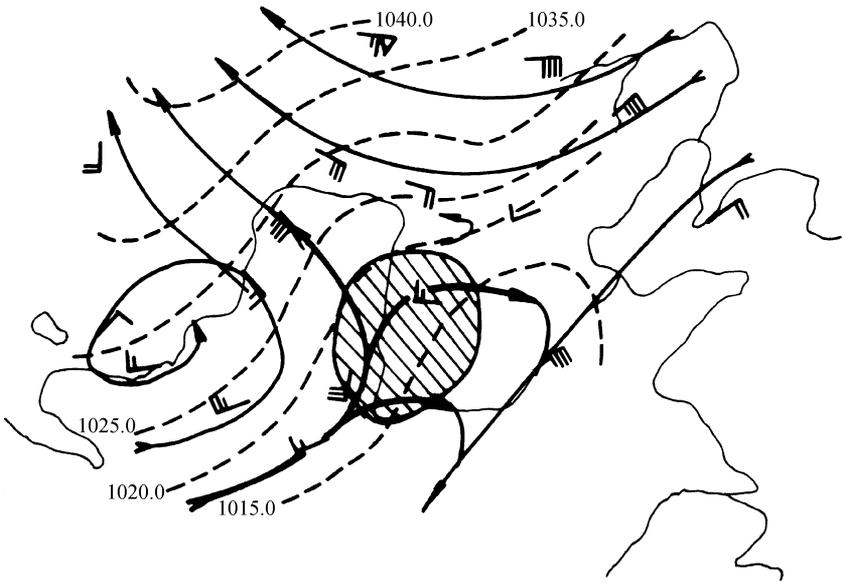


图3 1987年10月30日08时 F_v 场

实线: 流线; 虚线: 前24小时地面气压场; 斜线: 预报的中大雪爆发区

就从这个变风力场上还可看到,天气爆发前涡度平流早有明显或突然加强的趋势。这里只需将当日(30日08时)500 hPa实测流场(35~40°N间为西南西气流,图略)叠置于这幅变风场之上。由于变风的涡度等于实测风涡度的变化,因此在不考虑变风对测风涡度可能构成的平流这一部分影响(实际上相对较小)的情况下,不难证明(步骤略)实测风对变风涡度的平流,实际上就是实测风涡度平流的变化倾向。现在气流上游——兰州是气旋式变风场,下游——晋南是反气旋式变风场,这种分布本身就说明在晋西、陕北一带已经出现了涡度平流就要明显加强的倾向。

1979年2月18~19日美国东部爆发海岸气旋,酿成“总统日雪暴”。据称“业务

模式预报的 24 小时降雪量，不少地方都归于失败”^①。1986 年专门的研究机构将两个分辨率不同 (150 km, 50 km) 的有限区域模式，套入 30 波 9 层谱模式，用 1979 年 2 月 18 日 12 时 (世界时) 被初始化了 FGGE 资料和欧洲中期预报中心资料为初始场，得到了未来 18 小时和 24 小时风速、气压、温度和气旋西部降水的成功模拟，但气旋北部足够大的降水，依然没报出来 (图略)。下面只给出 1979 年 2 月 18 日 12 时 (世界时) 的变压力场 (图 4) 和变风力场 (图 5)。

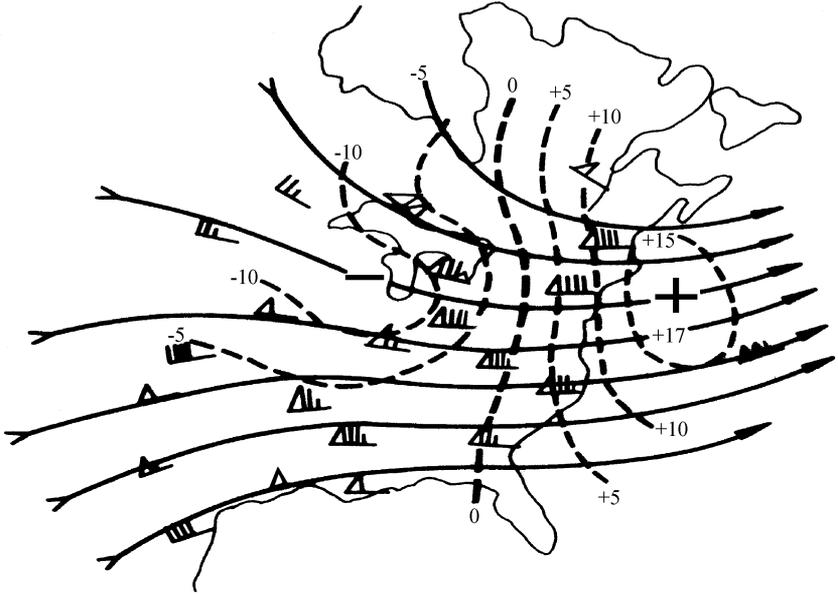


图 4 1979 年 2 月 18 日 12 时 (世界时) F_p 场, 其余同图 3

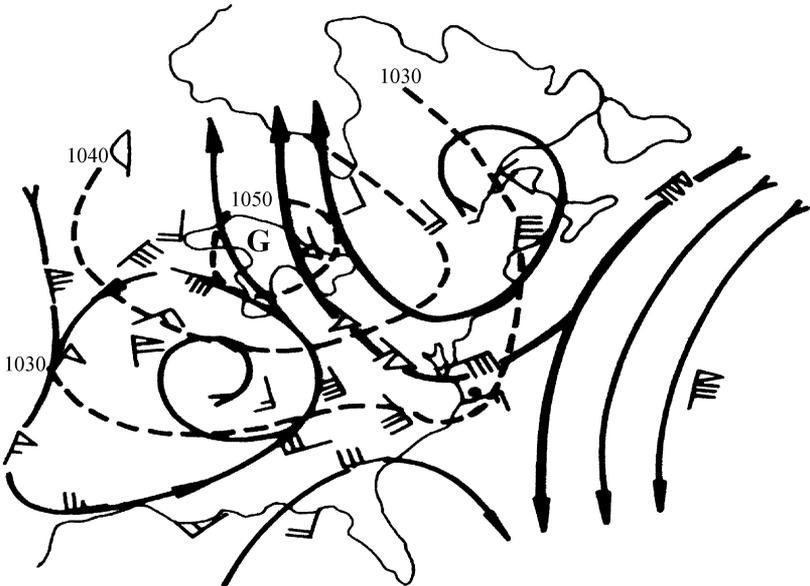


图 5 1979 年 2 月 18 日 12 时 (世界时) F_v 场, 其余同图 3

① 摘自“世界气象组织第 19 号 PSMP 系列报告”

同前一例相比,只是在具体数量上,本例比前一例更强。变压力场,在沿海的正变压中心同上游密执安湖以南强的负中心间,在阿巴拉契亚山和沿海地区形成强烈对比,变压线与气流网络交错更密集,变压力场的辐散约为 $0.94 \times 10^{-8} \text{ hPa s}^{-2}$,为前例的两倍。变风力场,美国东部沿海一带,力流明显分支,一支从海上南下,另一支强劲的力流直转西北,指向五大湖的高压区,即由前一日气压场低值吹向高值区,分支右侧转弯处变风力辐散最强,约为 $41.4 \times 10^{-8} \text{ hPa s}^{-2}$,爆发力合计辐散约为 $42 \times 10^{-8} \text{ hPa s}^{-2}$ 。比起我们事后分析过的其他亚欧诸例,这个数字是其中的甚强者。这里虽然尚无定量界限,但比照前例,可顺手圈出的中大雪或以上的强天气爆发区,没有理由不把华盛顿东南海岸一带“气旋北部足够大的降水”区囊括其中。

与爆发力场同一时刻的 500 hPa 实测风气流,在 $35 \sim 40^\circ \text{N}$ 间也是西南偏西气流(图略)。气流先后穿过路易斯城的气旋式变风涡,和美国东北沿海一带的反气旋式变风区,而且两者的变风涡度正负反差十分强烈,表明了五大湖以南地区已存在涡度平流将会急剧增强的明显趋势。当日高空西来弱扰动在次日的突然加强,就完全证实了这一点。

像在其他大量爆发实例中已经看到的一样,在这里可以看到垂直运动加速、天气的爆发以及爆发区上游侧高空涡度平流的骤然加强等,它们不外都是大气运动对爆发的响应,都是这种丰富的响应调整过程的方方面面。

5 结语

(1) 从大气运动的宏观力学行为和关系中探求天气爆发的原因机理,可行、有效。找到了致运动失衡之力——爆发力(即变风力与变压力)。

(2) 爆发力强迫大气失衡,同时大气自身作出响应调整以恢复平衡,两种过程同在,两种作用共存。响应过程的表现丰富而多彩,天气爆发只是这种特殊阶段的产物之一。

(3) 爆发力是大气运动固有的内部之力,从常规业务数据之中,容易计算出来。因而,一些灾重天气的爆发事件,还是有可能预报的。

前面的工作只是个开端,带有某种尝试性,但本文揭示的机理,并不只是对于短期天气预报有帮助。由于爆发方程牢固建立在连续方程或物质不灭定律的基础上,相应伸缩、改变方程的时空单位,并不影响它的正确性;同时也由于中、长期天气气候事件的发生,相对其预报时效长度也具有更多,甚或更为显著的“爆发性”,因此,在中、长期天气气候事件预报的天地里,前面揭示的机理,理应至少也存在开发应用的余地。

参 考 文 献

- 1 叶笃正、李麦村,大气运动的适应问题,北京:科学出版社,1965,51~58、124.
- 2 仪清菊、丁一汇,东海地区温带气旋爆发性发展的动力学分析,气象学报 1992,50(2),152~166.
- 3 沈括,梦溪笔谈,北京:团结出版社,1996,85.

- 4 Sutcliffe, R. C. , Rapid development where cold and warm air masses move toward each other, *Synop. Div. Tech. Men.* , 1940, (12) .
- 5 Petterssen, S. , *Weather Analysis and Forecasting* , Second Edition, Volume 1, McGraw—Hill, 1956, 428pp.

The Weather Break Mechanic Research and Its Preliminary Application

Wang Houji

(*Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010051*)

Abstract For explore the reason and mechanism of weather break or imbalance abruptly of movement of the atomospher, through change the level of view, to survey and analyse the macro—mechanics actions and relations, we have obtained the force which compel the movement going to imbalance suddenly, and given the break function, formed some new ideology. Through apply the break function, such a fact that broke events of some calamitous weather could be forecasted have come into our view.

Key words: weather break mechanic; the levels for observation; dynamic diagnosis